

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marinela Dugandžić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Statičko umjeravanje ticala uređaja za mjerjenje kružnosti

Mentor:

Doc. dr. sc. Vedran Šimunović

Studentica:

Marinela Dugandžić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc.dr.sc. Gorani Baršić na pomoći pri odabiru teme završnog rada, svim zaposlenicima Laboratorija za precizna mjerenja dužina na pruženoj pomoći, te posebno mentoru doc.dr.sc. Vedranu Šimunoviću na korisnim savjetima i stručnom vodstvu pri izradi ovoga rada.

Veliku zahvalu dugujem i svojim roditeljima za pruženu podršku tijekom cjelokupnog studiranja.

Marinela Dugandžić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marinela Dugandžić**

Mat. br.: 0035199895

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Statičko umjeravanje ticala uređaja za mjerenje kružnosti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Static probe calibration of roundness measurement device**

Opis zadatka:

Uređaj za mjerenje kružnosti sastoji se od dva osnovna sustava: mjernog sustava s ticalom i okretnog stola. Kako bi se osigurao pouzdan mjerni rezultat postupak umjeravanja mora obuhvatiti oba sustava, za što se uobičajeno koriste namjenski „flick“ ili „Multi-wave“ etaloni. Recentna istraživanja predlažu metode za zasebno umjeravanje mjernog sustava, te zasebnu provjeru greške rotacije okretnog stola, čime se omogućava umjeravanje bez upotrebe navedenih etalona. Cilj ovog rada je predložiti metodu umjeravanja ticala uređaja za mjerenje kružnosti u statičkim uvjetima, te temeljem mjernih rezultata donijeti zaključke o primjeni predložene metode.

U radu je potrebno:

1. Opisati metodu mjerenja kružnosti s vanjskom mjernom referencom.
2. Dati pregled etalonske baze za umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti.
3. Predložiti metodu za umjeravanje ticala uređaja za mjerenje kružnosti.
4. Provesti mjerenja prema metodi iz točke 3.
5. Analizirati i dati tumačenje dobivenih rezultata.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Vedran Šimunović

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. KRUŽNOST.....	3
2.1 Razlozi ispitivanja kružnosti	5
3. ISPITIVANJE KRUŽNOSTI.....	8
3.1 Uređaji s vanjskom mjernom referencom	8
3.1.1 Tip rotirajućeg ticala.....	8
3.1.2 Tip rotirajućeg stola	9
3.2 Numeričke metoda proračuna odstupanja od kružnosti	10
3.3 Ispitivanje kružnosti u LFSB.....	12
4. SADAŠNJI NAČIN UMJERAVANJA	18
4.1 Osiguravanje sljedivosti	18
4.2 Etaloni	19
4.2.1 Mjerna polukugla	20
4.2.2 Flick etalon.....	20
4.2.3 Multi-wave etalon (MWS).....	21
4.3 Umjeravanje u LFSB.....	22
4.3.1 Korekcija ticala	23
4.3.2 Umjeravanje ticala	24
4.3.3 Umjeravanje okretnog stola	24
5. NOVI NAČIN STATIČKOG UMJERAVANJA TICALA	25
5.1 Umjeravanje pomoću univerzalnog mjernog uređaja.....	25
5.2 Umjeravanje pomoću piezo aktuatora	28
5.2.1 Piezo aktuator.....	28
5.2.2 Postupak umjeravanja	30
5.3 Usporedba dviju metoda umjeravanja	34

5.3.1 Mjerno područje $\pm 3 \mu m$	34
5.3.2 Mjerno područje $\pm 10 \mu m$	39
5.3.3 Mjerno područje $\pm 30 \mu m$	43
6. DINAMIČKO UMJERAVANJE TICALA	48
7. ZAKLJUČAK	53
LITERATURA.....	54

POPIS SLIKA

Slika 1	Odstupanje od kružnosti [1]	3
Slika 2	Tip rotirajućeg ticala [3]	9
Slika 3	Tip rotirajućeg stola [3]	10
Slika 4	Kružnica najmanjih kvadrata i profil predmeta [1].....	11
Slika 5	Osnovni dijelovi uređaja „MMQ-3“ za ispitivanje kružnosti	13
Slika 6	Okretni stol uređaja za mjerenje kružnosti	14
Slika 7	Induktivno ticalo uređaja za mjerenje kružnosti.....	15
Slika 8	Elektronski uređaj za mjerenje i upravljanje (militron)	16
Slika 9	Kompjuterska kartica PCI – DAS6034 [3].....	16
Slika 10	Mjerni sustav za ispitivanje kružnosti.....	17
Slika 11	Lanac sljedivosti [4]	19
Slika 12	Mjerna polukugla.....	20
Slika 13	Skica Flick etalona i Odstupanje od kružnosti u ovisnosti o kutu rotacije [7]	20
Slika 14	Multi-wave etalon [6]	22
Slika 15	Umjeravanje ticala pomoću ULM uređaja.....	23
Slika 16	Postupak centriranja referentne polukugle	24
Slika 17	Piezo stage P-621.ZCD [8].....	29
Slika 18	Piezo servo kontroler E-625.CR [9].....	30
Slika 19	Postavljanje piezo aktuatora na MMQ-3 uređaj	31
Slika 20	Odnos referentne vrijednosti i napona za mjerenje pomoću ULM uređaja za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$	36
Slika 21	Odnos referentne vrijednosti i napona za mjerenje pomoću piezo aktuatora za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$	36
Slika 22	Odnos referentne vrijednosti i napona za mjerenje pomoću ULM uređaja za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$	40
Slika 23	Odnos referentne vrijednosti i napona za mjerenje pomoću piezo aktuatora za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$	40
Slika 24	Odnos referentne vrijednosti i napona za mjerenje pomoću ULM uređaja za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$	44
Slika 25	Odnos referentne vrijednosti i napona za mjerenje pomoću piezo aktuatora za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$	44
Slika 26	Opcija „Wave Editor“ u programu za piezo aktuator	48
Slika 27	Prikaz „Wave Table Output“ u programu za piezo aktuator	49
Slika 28	Prikaz naredbi za ostvarivanje pomaka u programu za piezo aktuator	49

POPIS TABLICA

Tablica 1	Oblici odstupanja od kružnosti	4
Tablica 2	Utjecaj odstupanja od kružnosti na funkcionalnost predmeta	6
Tablica 3	Podatci mjerenja na ULM uređaju za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$	26
Tablica 4	Podatci mjerenja na ULM uređaju za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$	27
Tablica 5	Podatci mjerenje na ULM uređaju za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$	28
Tablica 6	Podatci mjerenja pomoću piezo aktuatora za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$	32
Tablica 7	Podatci mjerenja pomoću piezo aktuatora za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$	33
Tablica 8	Podatci mjerenja pomoću piezo aktuatora za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$	34
Tablica 9	Rasipanja napona za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$	35
Tablica 10	Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću ULM uređaja za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$	37
Tablica 11	Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja A) za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$	37
Tablica 12	Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja B) za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$	38
Tablica 13	Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja A i B) za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$	38
Tablica 14	Rasipanja napona za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$	39
Tablica 15	Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću ULM uređaja za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$	41
Tablica 16	Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja A) za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$	41
Tablica 17	Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja B) za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$	42
Tablica 18	Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja A i B) za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$	42
Tablica 19	Rasipanja napona za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$	43
Tablica 20	Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću ULM uređaja za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$	45
Tablica 21	Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja A) za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$	45
Tablica 22	Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja B) za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$	46
Tablica 23	Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja A i B) za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$	46

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis oznake
T_K	μm	odstupanje od kružnosti
x_i, y_i	mm	koordinate i-te točke profila predmeta
r_i	mm	radij-vektor i-te točke profila predmeta
e_x, e_y	mm	koordinate središta LSC kružnice
R_{LSC}	mm	polumjer LSC kružnice
R	V	raspon rezultata mjerenja
n	-	broj točaka profila

SAŽETAK

Ovaj rad može se podijeliti na četiri osnovne cjeline u kojima je prikazano:

1. Što je kružnost i zašto se mjeri odstupanje od kružnosti;
2. Način ispitivanja kružnosti;
3. Sadašnji način umjeravanja ticala uređaja za ispitivanje kružnosti;
4. Novi način umjeravanja ticala uređaja za ispitivanje kružnosti.

U prvom dijelu definirani su pojmovi kružnost i odstupanje od kružnosti te je objašnjeno zašto je bitno mjerenje odstupanja od kružnosti. Navedeni su neki od karakterističnih oblika odstupanja od kružnosti te utjecaj odstupanja od kružnosti na funkcionalnost predmeta.

U drugom dijelu opisani su tipovi uređaja za ispitivanje kružnosti i numeričke metode koje se koriste za računanje odstupanja od kružnosti. Također je prikazan postupak ispitivanja kružnosti u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje (LFSB).

Treći dio odnosi se na dosadašnji način umjeravanja uređaja za mjerenje kružnosti Mahr Parthen MMQ-3. Opisani su etaloni potrebni za umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti te postupak statičkog umjeravanja ticala pomoću univerzalnog mjernog uređaja (ULM) Joint Microrep DMS 680, kako se do sada provodio u LFSB-u.

Posljednja cjelina sadrži rezultate dosadašnje metode statičkog umjeravanja ticala usporedene s rezultatima predložene nove metode statičkog umjeravanja ticala korištenjem piezo aktuatora. Prikazana je analiza rezultata s ciljem ispitivanja adekvatnosti korištenja nove metode za umjeravanje ticala. Kao dodatak, obavljeno je i dinamičko umjeravanje ticala simulacijom Flick etalona korištenjem piezo aktuatora.

SUMMARY

This paper can be divided into four main parts in which following numbers are explained:

1. What is roundness and why it is important to measure out of roundness;
2. Procedure of out of roundness measurement;
3. Present stylus calibration method of roundness measuring instrument;
4. New stylus calibration method of roundness measuring instrument.

In the first part, term „roundness“ is defined. Also, importance of out of roundness measurement is explained. Several typical forms of roundness errors are listed, as well as influence of roundness on functionality of an object.

In the second part, two types of roundness measuring instruments and numerical methods that are used for roundness determination are explained. Also, the procedure for roundness measurement in the Laboratory for Precise Measurement of Length (LFSB) of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture is demonstrated, step by step.

The third part refers to the present calibration method of the roundness measuring instrument Mahr Parthen MMQ-3. Standards used for calibration of the roundness measuring instrument, as well as the procedure of static stylus calibration, using universal length machine (ULM) Joint Microrep DMS 680, are illustrated. The procedure is presented in the way it has been used in LFSB.

The last part contains results of the present static stylus calibration method and results of new static stylus calibration method using piezo actuator. Suitability of application of this new stylus calibration method is examined by comparing results of previously mentioned methods. Additionally, dynamic stylus calibration is carried out using piezo actuator for Flick standard simulation.

1. UVOD

Predmeti kružnog poprečnog presjeka jedni su od najčešće izrađivanih u području strojarstva. Zbog različitih metoda obrade te ograničenja u tehnologijama potrebnima za njihovu proizvodnju, poprečni presjeci odstupaju od idealne kružnice. U kolikoj mjeri smiju odstupati od idealne kružnice definira se dopuštenim odstupanjem od kružnosti, a uređajima za mjerenje kružnosti utvrđuje se koliko iznosi odstupanje od kružnosti te kako izgleda poprečni presjek proizvedenog predmeta.

Kako bi bili sigurni da uređaj za mjerenje kružnosti pokazuje pouzdane vrijednosti, uređaj mora biti umjeren. Umjeravanjem se izmjerena vrijednost dovodi u vezu s definicijom metra uz određenu mjernu nesigurnost.

U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a (LFSB) umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti MMQ-3 sastoji se od postupka provjere točnosti ticala i postupka provjere točnosti rotacije okretnog stola. Greška rotacije okretnog stola relativno jednostavno se utvrđuje mjerenjem referentne polukugle, dok utvrđivanje pogreške ticala zahtjeva dosta složeniji postupak. Potrebno je premjestiti ticalo, militrón i računalo uređaja MMQ-3 na umjereni univerzalni mjerni uređaj (ULM) te pričvrstiti ticalo istom silom i da se nalazi pod istim kutom kao što je na uređaju MMQ-3. Na ULM uređaju ručno se ostvaruje referentni pomak te se pomoću ticala prikupljaju podatci o pomaku koji se dalje obrađuju.

Korištenjem piezo aktuatora umjesto ULM uređaja mogao bi se značajno olakšati i ubrzati postupak provjere točnost - umjeravanja ticala. Naime, umjereni piezo aktuator ostvaruje referentni pomak tako da se naredbe za pomak šalju pomoću računala, a najveća prednost je što se sastavni dijelovi uređaja MMQ-3 ne moraju nigdje premještati, već se mjerenja provode na samom uređaju. Potrebno je osigurati ispravno postavljanje piezo aktuatora na okretni stol uređaja za mjerenje kružnosti na sličan način kao što bi se i postavio predmet mjerenja na kojem bi se mjerilo odstupanje od kružnosti. Razlika je u tome što se okretni stol ne rotira, dok se pokretna površina piezo aktuatora giba i uzrokuje otklon ticala. Mjeri se napon koji nastaje zbog tog otklona, a umjeravanjem se nastoji odrediti faktor pomoću kojeg se izmjereni naponi preračunavaju u duljinu, odnosno mikrometre, tako da izmjerene vrijednosti u mikrometrima što manje odstupaju od referentnih vrijednosti pomaka piezo aktuatora.

Za piezo aktuator mogu se programirati ne samo trenutni pomaci, nego i valovi pomaka koji se uzastopno ponavljaju tijekom određenog vremenskog perioda. Tako se mogu programirati pomaci piezo aktuatora koji mogu zamijeniti Flick etalon, kojeg LFSB ne posjeduje, te se može obaviti i dinamičko umjeravanje ticala. Dinamičkim umjeravanjem provjeravaju se pokretljivost ticala i softverska podrška uređaja, odnosno algoritmi za izračunavanje odstupanja od kružnosti.

U ovome radu ispituje se adekvatnost statičkog umjeravanja ticala pomoću piezo aktuatora. Istraživanje se provelo u dva dijela:

1. Eksperimentalni dio:

- statičko umjeravanje ticala korištenjem univerzalnog mjernog uređaja ULM-a
- statičko umjeravanje ticala korištenjem piezo aktuatora
- dinamičko umjeravanje ticala simulacijom Flick etalona pomoću piezo aktuatora.

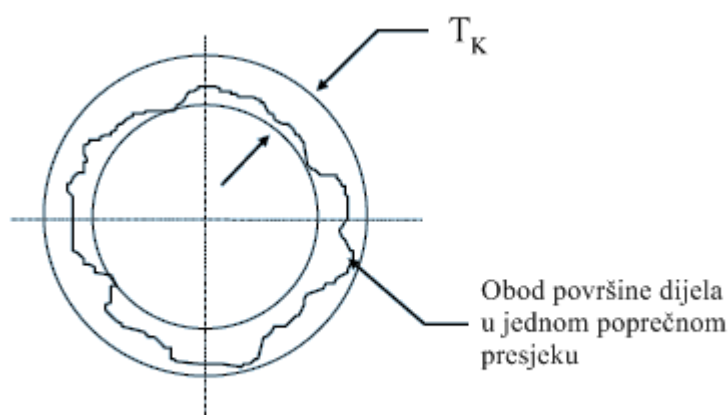
2. Teorijski dio:

- usporedba rezultata mjerenja pomaka ostvarenih ULM-om i piezo aktuatorom
- analiza adekvatnosti upotrebe piezo aktuatora za umjeravanje induktivnih ticala
- analiza rezultata ostvarenih simuliranim Flick etalom
- prijedlog budućeg istraživanja.

2. KRUŽNOST

Kružnost se odnosi na stanje kružne linije ili površine kružnog dijela, kod kojeg su sve točke na liniji ili na obodu poprečnog presjeka dijela jednako udaljene od središnje točke. U stvarnosti neće sve točke biti jednako udaljene od središta pa se uvodi dozvoljeno odstupanje unutar kojeg trebaju biti smještene točke da bi bili zadovoljeni kriteriji za kružnost.

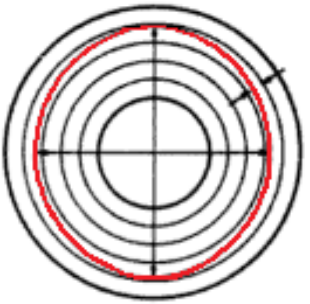
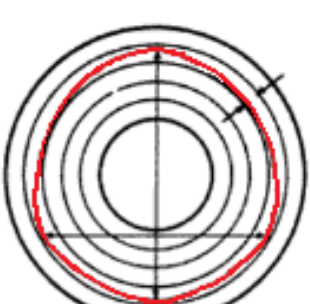
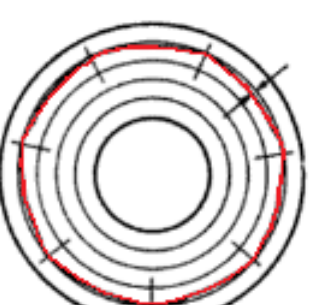
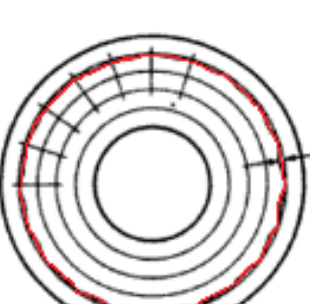
Dozvoljeno odstupanje od kružnosti određeno je površinom između dvije komplanarne koncentrične kružnice čija je razlika polumjera T_K [Slika 1]. Linija profila ne smije ni jednom točkom izlaziti van kružnog vijenca [1].

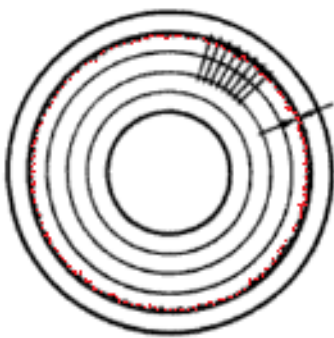
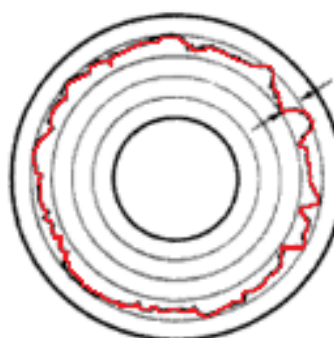


Slika 1 Odstupanje od kružnosti [1]

Zbog velike raznolikosti metoda obrade, opreme i uvjeta, pojavljuju se različite točnosti dimenzija i odstupanja od kružnosti. S različitim metodama obrade i uvjetima mogu se povezati karakteristični tipovi odstupanja od kružnosti. Tako su na temelju iskustvenih podataka prikazani neki od najčešćih oblika odstupanja od kružnosti u odnosu na idealne kružnice [Tablica 1].

Tablica 1 Oblici odstupanja od kružnosti [2]

Dijagram poprečnog presjeka (preuveličano)	Imenovanje i opis	Potencijalni uzroci i značajne karakteristike
	<p>Ovalnost s nejednakim osima koje su približno okomite jedna na drugu i u odnosu na idealni profil.</p>	<p>Neporavnatost šiljka alalnog stroja i/ili središnjeg gnijezda izratka. Značajna dimenzija je razlika između manje i veće osi.</p>
	<p>Jajolikost, u suštini ovalanost, ali manja i veća os nisu simetrično postavljene.</p>	<p>Odstupanja šiljka alalnog stroja i/ili središnjeg gnijezda izratka. Oštećenja šiljaka ili gnijezda. Odstupanje osi od simetričnosti značajno je za funkcionalnost.</p>
	<p>Izbočenost karakterizirana neparnim brojevima izbočina u pravilu sličnog razmaka. Tipični brojevi izbočina duž opsega su 3, 5, 7 i 9.</p>	<p>Brušenje bez središnjeg gnijezda, kada nije adekvatno kontrolirano. Stezanje u strojnom škripcu (amerikaneru).</p>
	<p>Valovitost (konturne izbočine, srednja frekvencija). Valovi konture su konzistentni u razmaku i amplitudama u odnosu na idealnu kružnicu.</p>	<p>Vibracije alalnog stroja i/ili nedovoljna krutost izratka.</p>

	<p>Visokofrekventne izbočine (usko povezano s površinskom hrapavosti). Vrlo malen razmak između izbočina i malena amplituda.</p>	<p>Obično povezano s karakteristikama procesa obrade, kao što je veličina brusnog zrna, posmak i slično. Često se namjerno zanemaruje ili potisne filtriranjem kada se priprema mjerenje kružnosti.</p>
	<p>Nasumične nepravilnosti prepoznatljive po neperiodičnim pojavljivanjima izbočina u odnosu na idealnu kružnicu.</p>	<p>Može se pojaviti zbog različitih, neprikladno kontroliranih uvjeta u procesu brušenja. Često povezano s neodgovarajućom stabilnošću pri pozicioniranju i stezanju.</p>

2.1 Razlozi ispitivanja kružnosti

Jedan od osnovnih zahtjeva rotaciono-simetričnih predmeta je zadovoljavajuće odstupanje od kružnosti. Važnost mjerenja odstupanja od kružnosti naglašena je s tim da je kružni presjek jedan od najčešće korištenih osnovnih oblika u strojarstvu. Kružni oblik često se upotrebljava jer:

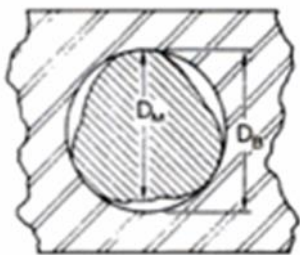

- jednostavan je za definiranje, potrebna je samo dimenzija promjera;
- najjednostavniji je za proizvodnju velikim brojem metoda obrade;
- može se mjeriti samo jedna dimenzija (promjer) s manje potencijalnih pogrešaka u odnosu na druge oblike;
- ima nekoliko funkcionalnih prednosti, kao što su jednostavna montaža, glatko kotrljanje i jednolika snaga u svim smjerovima simetrično na središnju os.

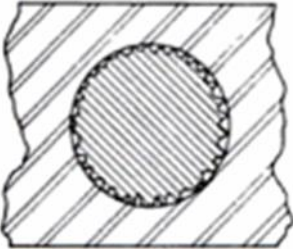
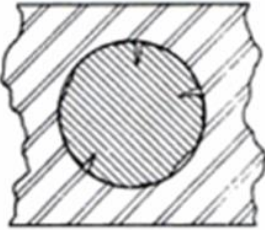
Različite namjene koje predmeti kružnog oblika izvršavaju rezultiraju velikim rasponom zahtjeva za kružnost. Kako bi propisno funkcionirali ili kako bi zadovoljili neke druge

zahtjeve povezane s uporabom predmeta, većina tehničkih dijelova ima definirana dopuštena odstupanja od oblika. Dakle, pouzdano ispitivanje kružnosti je važan proces za osiguravanje zahtijevanih funkcionalnih karakteristika predmeta s kružnim poprečnim presjekom.

U principu definiranje zahtjeva za kružnost spada u konstrukcijske specifikacije i trebalo bi biti prikazano na radioničkom crtežu. Budući da odstupanje od idealne kružnice može imati različite karakteristične oblike, često nije moguće definirati odstupanje pomoću jedne dimenzije, kao što je to prikazano na radioničkom crtežu. Zbog toga razumijevanje funkcionalnih posljedica grešaka kružnosti može pridonijeti informativnijem prikazivanju mjera odstupanja od kružnosti kako bi se ustanovila adekvatnost ispitivanog predmeta za njegovu namjenu. Kao uvod za funkcionalnu procjenu nedostataka kružnosti prikazano je nekoliko tipičnih primjena u kojima određena vrsta odstupanja od kružnosti može imati štetne posljedice na ispravno funkcioniranje predmeta [Tablica 2] [2].

Tablica 2 Utjecaj odstupanja od kružnosti na funkcionalnost predmeta [2]

Prikaz poprečnog presjeka (preuveličano)	Tipične posljedice koje utječu na funkcionalnost
	<p>Promjer poprečnog presjeka rotaciono-simetričnog predmeta predstavlja njegovu reprezentativnu dimenziju.</p> <p>Razlika između tako izmjerene promjera i promjera rupe u koju se treba umetnuti taj predmet može biti uzrokom funkcionalne manjkavosti ili poteškoća pri montaži.</p>
	<p>Izbočine koje prelaze preko površine idealne kružnice mogu narušiti namjeravanu točnost nalijeganja te prekidanjem filma maziva uzrokovati štetni kontakt metala.</p>

	<p>Određeni dijelovi izbočina mogu se slomiti zbog velikih opterećenja nastalih zbog koncentracija naprezanja većih od proračunatih vrijednosti. Posljedica je labavljenje spoja.</p>
	<p>Praznine u kontaktu između dosjednih površina zbog prekida u kontinuitetu konture poprečnog presjeka mogu uzrokovati istjecanje fluida koje je trebalo biti spriječeno čvrstim dosjedom.</p>

3. ISPITIVANJE KRUŽNOSTI

3.1 Uređaji s vanjskom mjernom referencom

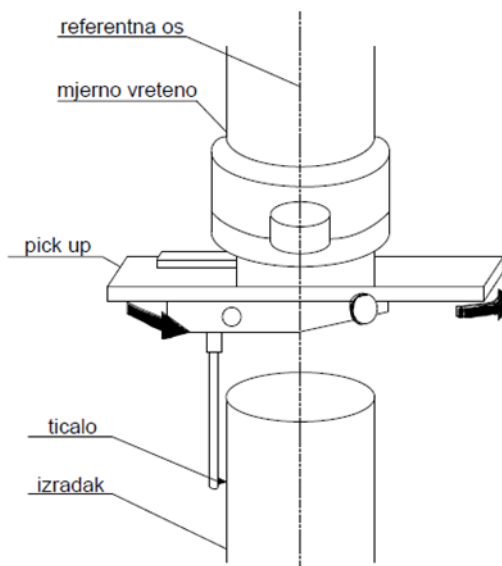
Jedna od najčešće primjenjivanih metoda ispitivanja kružnosti je mjerenje pomoću uređaja s vanjskom mjernom referencom. Dakle, za mjernu referencu uzima se os rotacije precizno izrađenog vretena s izrazito velikom točnošću rotacije. Budući da referenca nije vezana uz predmet koji se ispituje te nije promjenjiva tijekom mjerenja, postiže se veća preciznost mjerenja. Prednosti ove metode zbog koje se često primjenjuje su:

- prikazuje stvarni prikaz geometrijskih karakteristika ispitivanog predmeta;
- intenzitet suzbijanja nekonzistentnih značajki (filtriranje) može se mijenjati kako bi se poboljšali značajni aspekti stanja kružnosti;
- grafički prikaz kružnosti ispitivanog predmeta prikladan je za detaljnu analizu te se može interpretirati različitim matematičkim metodama;
- kontinuiranim praćenjem ticalom po cijeloj površini predmeta u odabranoj ravnini isključuje se mogućnost zanemarivanja pogrešaka koje je moguće propustiti mjerenjem „point-to-point“ [2].

Metoda ispitivanja kružnosti s vanjskom mjernom referencom može se provoditi pomoću dva tipa uređaja za ispitivanje kružnosti: tip rotirajućeg ticala i tip rotirajućeg stola.

3.1.1 Tip rotirajućeg ticala

Mjerenje pomoću ovakvih uređaja provodi se tako da se ispitni uzorak postavi na stol i ostaje fiksiran tijekom cijelog mjerenja, odnosno nema gibanja uzorka. Ticalo je u kontaktu s uzorkom te kruži oko njega. Tijekom gibanja ticala, ono prikuplja potrebne podatke (točke) te se linearni ili polarni graf promatranog poprečnog presjeka prikazuje na monitoru.



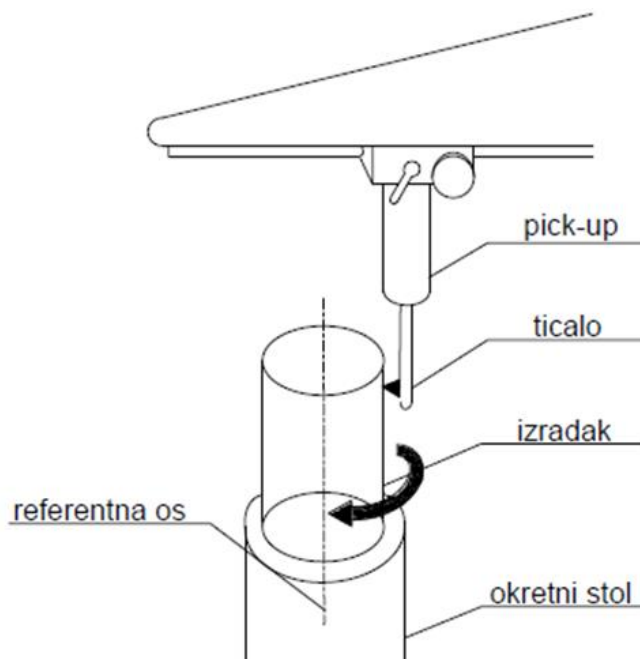
Slika 2 Tip rotirajućeg ticala [3]

Karakteristike mjerenja pomoću uređaja s rotirajućim ticalom:

- stol na kojeg se postavlja ispitni uzorak nije dio mjernog sustava pa može biti masivan;
- mjerenja su manje ograničena težinom ispitnog uzorka;
- mogu se mjeriti i uzorci većih dimenzija;
- sila koja djeluje na ticalo ostaje konstantna;
- rotacijska točnost ticala ne ovisi o težini ispitnog uzorka;
- ticalo je osjetljivo na trenutne promjene temperature;
- može se postići velika točnost ispitivanja jer mjerno vreteno koje predstavlja mjernu referencu nosi samo „pick-up“ male težine [2] [3].

3.1.2 Tip rotirajućeg stola

Princip ispitivanja kružnosti pomoću uređaja s rotirajućim stolom je takav da se ispitni uzorak postavi na rotirajući stol tako da se os rotacije uzorka poklapa s osi rotacije stola. Uzorak rotira zajedno sa stolom dok ticalo miruje i mjeri odklon tijekom gibanja uzorka te se rezultati mjerenja prikazuju na monitoru u obliku linearnog ili polarnog grafa.



Slika 3 Tip rotirajućeg stola [3]

Karakteristike mjerenja pomoću uređaja s rotirajućim stolom:

- mjerna referenca je os rotacije stola što osigurava ponovljivost rezultata ispitivanja;
- manja je osjetljivost sustava na trenutne promjene temperature;
- za točnost rezultata mjerenja iznimno je bitna točnost rotacije stola;
- točnost rotacije stola može biti narušena ispitnim uzorkom prevelike težine;
- mogu se uspostaviti kontakti za kontinuirano uzimanje podataka, bez mijenjanja izvornog postavljanja, na različitim razinama i na dijelovima različitih promjera istog predmeta. Takva mjerenja važna su za ispitivanje koaksijalnosti [2].

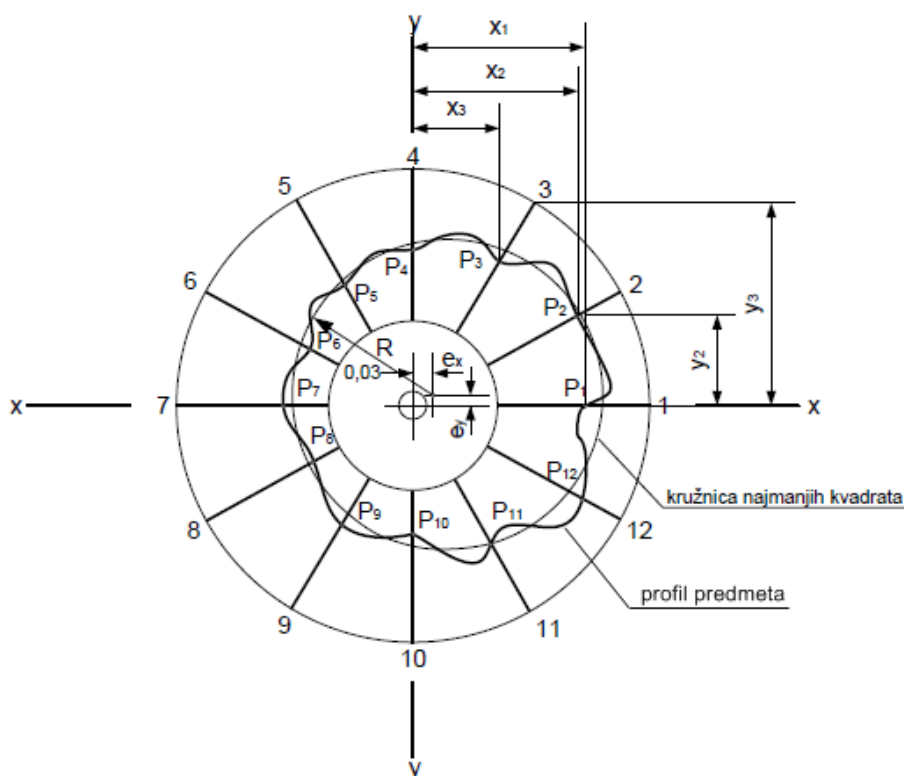
3.2 Numeričke metoda proračuna odstupanja od kružnosti

Rezultati mjerenja poprečnog presjeka ispitnog uzorka, prikupljeni uređajem za mjerenje kružnosti, obrađuju se korištenjem računala. Pomoću računala provode se numeričke metode proračuna odstupanja od kružnosti.

Prema ISO 1218 postupak procjenjivanja odstupanja od kružnosti bazira se na traženju središta slijedećih referentnih kružnica:

- kružnice najmanjih kvadrata (*Least Squares Circle*)
- najmanje kružne zone (*Minimum Zone Circles*)
- najmanje opisane kružnice (*Minimum Circumscribed circle*)
- najveće upisane kružnice (*Maximum Inscribed Circle*)

U ovom radu koristit će se rezultati iznosa odstupanja od kružnosti dobiveni pomoću temeljne numeričke metode proračuna odstupanja od kružnosti - LSC metode (kružnica najmanjih kvadrata).



Slika 4 Kružnica najmanjih kvadrata i profil predmeta [1]

Za kružnicu najmanjih kvadrata (LSC kružnicu), matematička definicija glasi: “Suma kvadrata dovoljnog broja jednako kutno razmaknutih radijalnih udaljenosti točaka profila od te kružnice, ima najmanju vrijednost“. Na temelju točaka profila određuju se parametri kružnice, kao što su koordinate središta kružnice i polumjer. Jednadžbe za računanje koordinata središta LSC kružnice (3.2-1, 3.2-2) i polumjera iste (3.2-3) glase:

$$e_x = \frac{2 \sum x_i}{n} \quad (3.2-1)$$

$$e_y = \frac{2 \sum y_i}{n} \quad (3.2-2)$$

$$R = \frac{\sum r_i}{n} \quad (3.2-3)$$

U ovim jednadžbama e_x predstavlja x-koordinatu središta LSC kružnice, x_i x-koordinatu i-te točke profila predmeta, n broj točaka profila predmeta, e_y y-koordinatu središta LSC kružnice, y_i y-koordinatu i-te točke profila predmeta, R polumjer LSC kružnice, te r_i radij-vektor i-te točke profila predmeta [Slika 4].

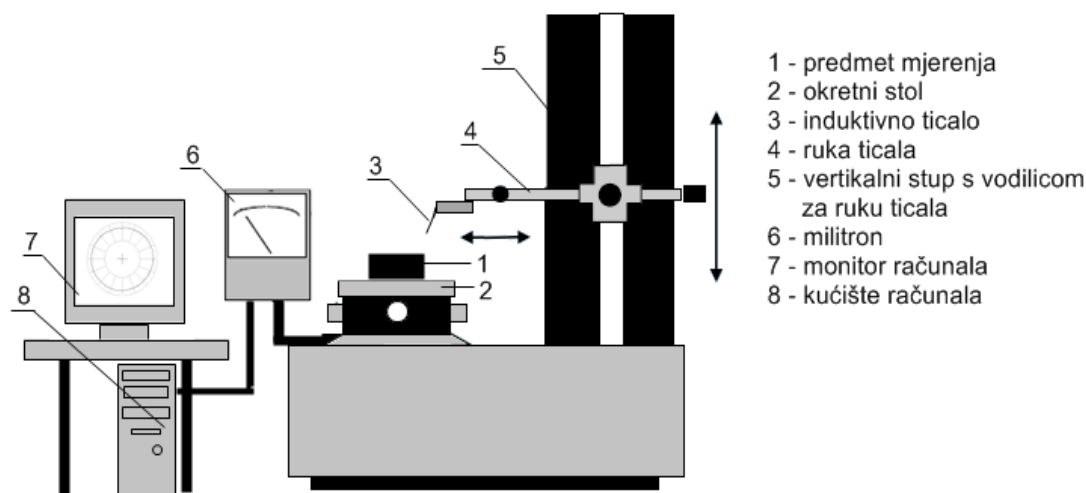
Točnost određivanja koordinata središta kružnice najmanjih kvadrata ovisi o broju uzetih točaka profila, pa se uzima da je 96 ordinata dovoljno da bi se pouzdano odredili parametri kružnice najmanjih kvadrata. Izračunato središte kružnice najmanjih kvadrata predstavlja središnju os uzorka koji se mjeri. Tada odstupanje od kružnosti predstavlja zbroj udaljenosti najvećeg brijega (*Peak*) i najvećeg dola (*Valley*) profila ispitnog uzorka od kružnice najmanjih kvadrata [3].

3.3 Ispitivanje kružnosti u LFSB

Laboratorij za precizna mjerenja dužina (LFSB) Fakulteta strojarstva i brodogradnje koristi uređaj MMQ-3 proizvođača „Mahr Parthen“ za ispitivanje kružnosti. To je uređaj s okretnim stolom koji koristi metodu ispitivanja kružnosti s vanjskom mjernom referencom.

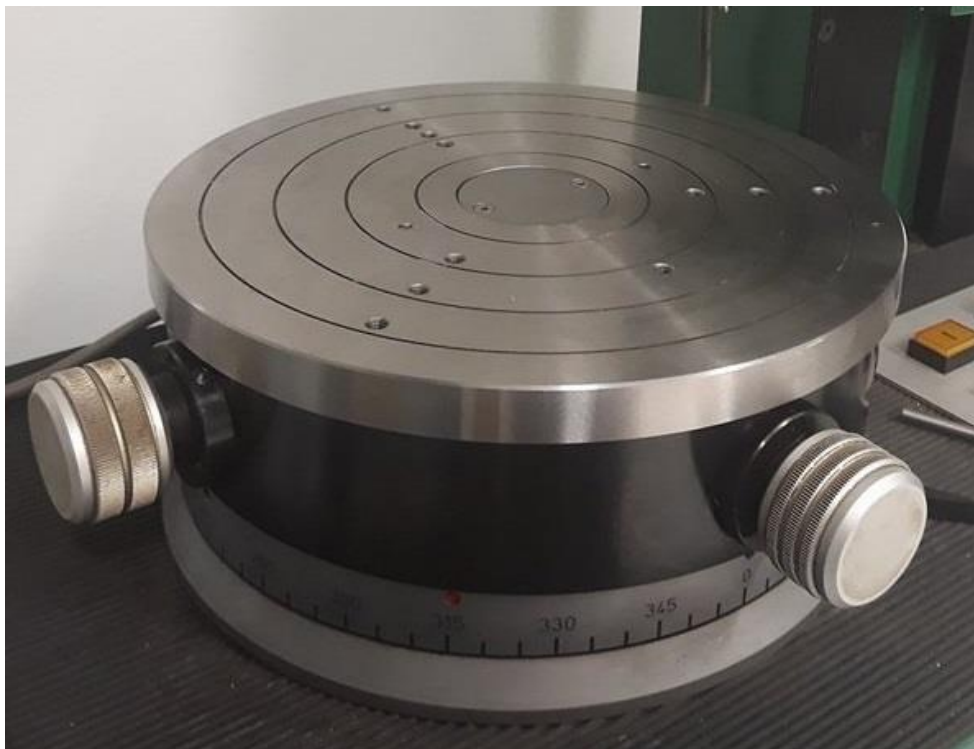
Osnovni dijelovi uređaja su:

- Okretni stol
- Induktivno ticalo
- Stup s vodicom
- Ruka ticala
- Pojačalo signala (militron)
- Računalo



Slika 5 Osnovni dijelovi uređaja „MMQ-3“ za ispitivanje kružnosti

Okretni stol [Slika 6] služi za vremenski ujednačeno rotiranje ispitnog uzorka postavljenog na njemu. Stol treba imati što veću geometrijsku točnost osi rotacije, odnosno točnost vrtnje vretena okretnog stola, jer to utječe na ispravnost i ponovljivost rezultata mjerenja. Okretni stol ovog uređaja posjeduje dva precizna vijka za centriranje uzorka u x-y ravnini, te još dva za podešavanje nagiba (rotacija oko x i y osi). Na dnu stola nalaze se brojčane oznake koje predstavljaju iznos kuta pri rotaciji, od 0° do 360° . Pomoću ovakvih finih načina reguliranja translacije i rotacije stola, može se postići precizno centriranje uzorka koji će se ispitivati.



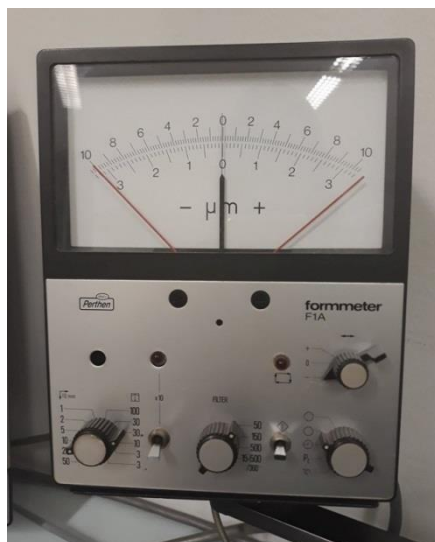
Slika 6 Okretni stol uređaja za mjerenje kružnosti

Na masivnom vertikalnom stupu, koji posjeduje vodilicu za ruku ticala, pričvršćena je ruka ticala, a na rubu ruke nalazi se ticalo za ispitivanje kružnosti. Ruka ticala može se micati vertikalno i horizontalno. Vertikalni pomak ruke omogućuje ispitivanje kružnosti na različitim poprečnim presjecima, odnosno u različitim ravninama okomitima na os rotacije uzorka, a ostvaruje se vretenom koje je pogonjeno električnim putem. Ruka ticala opremljena je preciznim vijkom pomoću kojeg se ostvaruje horizontalni pomak. Horizontalnim micanjem ruke ticalo se dovodi u kontakt s ispitnim uzorkom. Budući da je ticalo u kontaktu s uzorkom, svaka točka različite udaljenosti od središta predmeta u odnosu na udaljenost referentne točke od središta predmeta uzrokuje otklon ticala. Induktivno ticalo [Slika 7] registrira taj mehanički pomak i pretvara ga u analogni naponski signal.



Slika 7 Induktivno ticalo uređaja za mjerenje kružnosti

U elektronskom uređaju za mjerenje i upravljanje (militrone) [Slika 8] registriraju se pomaci ticala te se u njemu pojačava i obrađuje naponski signal. Na mjernoj skali militrone prikazuju se vrijednosti tog otklona, ovisno o odabranom mjernom području. Mogu se odabrati mjerna područja od $\pm 3 \mu\text{m}$, $\pm 10 \mu\text{m}$, $\pm 30 \mu\text{m}$, $\pm 100 \mu\text{m}$, $\pm 300 \mu\text{m}$ i $1000 \mu\text{m}$. Mjerno područje odabire se na temelju vrijednosti koje se trebaju mjeriti, tako da se izmjerene vrijednosti nalaze unutar mjernog područja. Često se odabire iduće veće mjerno područje ako se izmjerene vrijednosti nalaze na rubovima mjernog područja kako bi se izbjegla eventualna nelinearnost na rubovima. Postoje izvedbe uređaja koje imaju samo jedno mjerno područje što olakšava provedbu mjerenja, kao i postupak umjeravanja, jer se ne trebaju obavljati zasebna umjeravanja za manja mjerna područja, nego samo za jedno mjerno područje.



Slika 8 Elektronski uređaj za mjerenje i upravljanje (millitron)

Analogni naponski signal se digitalizira pomoću kompjuterske kartice za prikupljanje podataka (DAQ – *data aquisition board*) PCI – DAS6034 [Slika 9] proizvođača „Measurement Computing“. Karticu karakterizira 16 analognih ulaza u normalnom načinu rada ili 8 u diferencijalnom, 8 digitalnih ulaza i 8 digitalnih izlaza, 16 – bitna rezolucija A/D pretvornika, te mogućnost prikupljanja 200000 uzoraka po sekundi. Mjerno područje kartice kreće se od ± 25 mV do ± 10 V, dok maksimalna rezolucija iznosi 0,5 mV. Kartica se spaja na računalo preko standardne PCI sabirnice. Signal mjerenja preuzima se s izlaza upravljačke jedinice Millitron. Zbog veće točnosti mjerenja i smanjivanja elektromagnetskog šuma, korišten je tzv. diferencijalni način spajanja kod kojeg se signal i njegovo uzemljenje spajaju na odvojene kanale na kartici. Na taj način iznos uzemljenja se relativno oduzima od veličine signala, te korigira šum izazvan induciranjem napona na vodičima i samom uređaju. Pomoću softverskog rješenja (aplikacije) prikazuju se prikupljeni podaci, obrađuju se te izrađuju izvještaji o mjerenju [3].



Slika 9 Kompjuterska kartica PCI – DAS6034 [3]



Slika 10 Mjerni sustav za ispitivanje kružnosti

Ispitivanje kružnosti na uređaju MMQ-3 provodi se tako da se ispitni uzorak postavi na okretni stol i centrira, odnosno aksijalna os uzorka treba se poravnati s osi rotacije stola. Kada je predmet poravnat, vrh ticala dovodi se u kontakt s nekom točkom na konturi ispitivane kružnice predmeta. Pokretanjem okretnog stola predmet rotira zajedno s njim te se omogućava kontinuirano prikupljanje točaka kružne linije ispitivanog poprečnog presjeka. Pri mjerenju dolazi do otklona ticala, a induktivno ticalo registrira taj mehanički pomak i pretvara ga u naponski signal. Naponski signal se obrađuje u militronu i na njegovoj mjernoj skali se prikazuje vrijednost tog otklona. Svaka vrijednost otklona na mjernoj skali prikazuje se točno u tom trenutku. Signal se dalje prenosi na računalo opremljeno sa softverom za prikaz linearnog i polarnog grafa. Na monitoru se prikazuju rezultati ispitivanja neovisno o vremenu kada se provelo ispitivanje, odnosno podatci ostaju vidljivi i nakon obavljenog ispitivanja.

4. SADAŠNJI NAČIN UMJERAVANJA

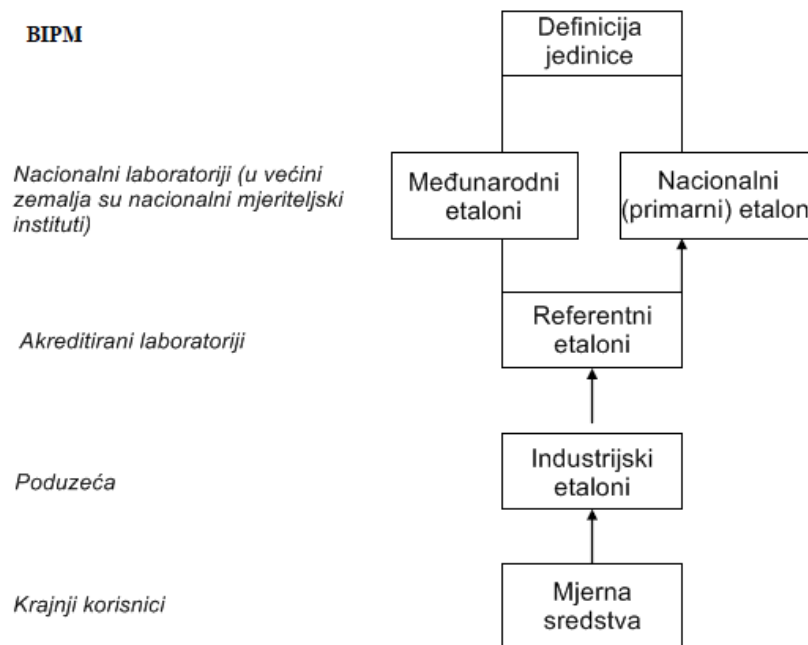
4.1 Osiguravanje sljedivosti

Mjeriteljstvo obuhvaća tri glavna zadatka:

- definiranje međunarodno prihvaćenih mjernih jedinica
- ostvarenje mjernih jedinica znanstvenim metodama
- utvrđivanje lanca sljedivosti pri određivanju i dokumentiranju vrijednosti i točnosti mjerenja i prenošenju tog znanja

Iz navedenog se vidi da je važan zadatak laboratorija za mjeriteljstvo osiguravanje sljedivosti. Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata kojim se rezultat dovodi u vezu s navedenim referencijskim etalonima (državnim ili međunarodnim) korištenjem neprekinutih lanaca umjeravanja. Svako umjeravanje doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti. Točnost rezultata ostvarenih mjerenjem određenog etalona ovisi o broju puta koliko je uspoređivan s etalomom višeg reda, recentnosti izvršene usporedbe, zadovoljenju uvjeta pri usporedbi te stabilnosti samog etalona.

Lanac sljedivosti je neprekidan lanac usporedbi, od kojih svaka ima utvrđenu mjernu nesigurnost. Ovakvim usporedbama osigurava se da mjerni rezultat ili vrijednost etalona bude povezana s referentnim etalonima na višoj razini. Lanac sljedivosti osigurava da različite mjerne metode i instrumenti korišteni u različitim državama u različito vrijeme daju pouzdane, ponovljive i usporedive rezultate mjerenja [Slika 11] [4] [5].



Slika 11 Lanac sljedivosti [4]

4.2 Etaloni

Etaloni su tvari koje predstavljaju referencu za utvrđivanje vrijednosti veličina i njihovih mjernih nesigurnosti te služe za uspostavljanje mjeriteljske sljedivosti.

Uređaji za ispitivanje oblika općenito su bolje optimizirani za ispitivanje kružnosti nego ravnosti i pravocrtnosti. Jedan od razloga je taj da se rotirajuće vodilice mogu obrađivati s većom preciznošću od linearnih vodilica. Ali postoji i glavni argument, a to je da su okrugli profili po definiciji zatvoreni. Stoga se mogu otkriti i ukloniti utjecaji kao što je termički pomak te se algoritmi za filtriranje mogu lakše primijeniti na zaobljene nego na ravne profile. Zbog svih tih razloga većina dostupnih etalona za umjeravanje uređaja za ispitivanje oblika su etaloni kružnog oblika. Općenito predmeti koji se moraju mjeriti s velikom točnošću imaju promjer u rasponu od 1 mm do 500 mm. Zbog toga je većina opreme za mjerenje prilagođena ovom rasponu tako da etaloni za kružnosti imaju nominalni promjer u rasponu od 20 mm do 100 mm [6].

4.2.1 Mjerna polukugla

Mjerne polukugle [Slika 12] napravljene su tako da svi poprečni presjeci okomito na os rotacije budu što sličniji idealnim kružnicama. U pravilu imaju grešku odstupanja od kružnosti u rasponu od nekoliko desetaka nanometara. Služe za otkrivanje radijalnih grešaka rotacije ili aksijalnih referenci za mjerenje kružnosti.

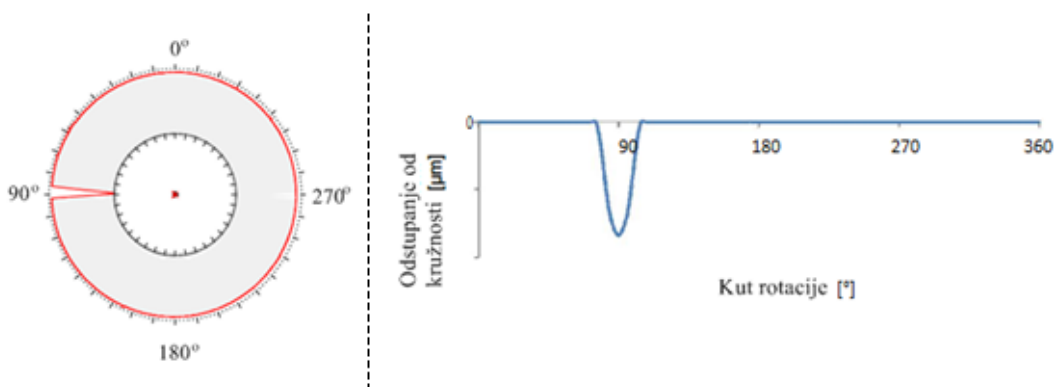
LFSB posjeduje referentnu polukuglu RET 227-509 proizvođača „Taylor Hobson“ čije odstupanje od kružnosti iznosi $0,026\ \mu\text{m}$.



Slika 12 Mjerna polukugla

4.2.2 Flick etalon

Flick etalon je etalon koji sadrži namjerno izazvanu pogrešku odstupanja od kružnosti. Kružnog je oblika s jednim zarezom (flick) koji prekida kontinuiranost konture kružnog poprečnog presjeka [Slika 13].



Slika 13 Skica Flick etalona (lijevo) i Odstupanje od kružnosti u ovisnosti o kutu rotacije (desno) [7]

Greška uvećanja ili osjetljivost uređaja za mjerenje kružnosti mogu se provjeravati mjerenjem Flick etalona. Također služi za provjeru softverske podrške uređaja, odnosno za provjeru ispravnosti algoritama za izračunavanje odstupanja od kružnosti [7].

Kružni oblik izrađen je približno obliku idealne kružnice s neznatnom greškom što služi kao referenca za provjeru uređaja koliko točno može ispitati odstupanje od kružnosti. Ako je etalon ispravan, svaki prikaz odstupanja od kružnosti (osim zareza) dobiven ispitivanjem tog etalona pomoću određenog uređaja upućuje na grešku u mjernom sustavu. Na temelju toga mogu se istražiti uzroci takvih grešaka te ih se može pokušati eliminirati ili korigirati rezultate na ispravan način.

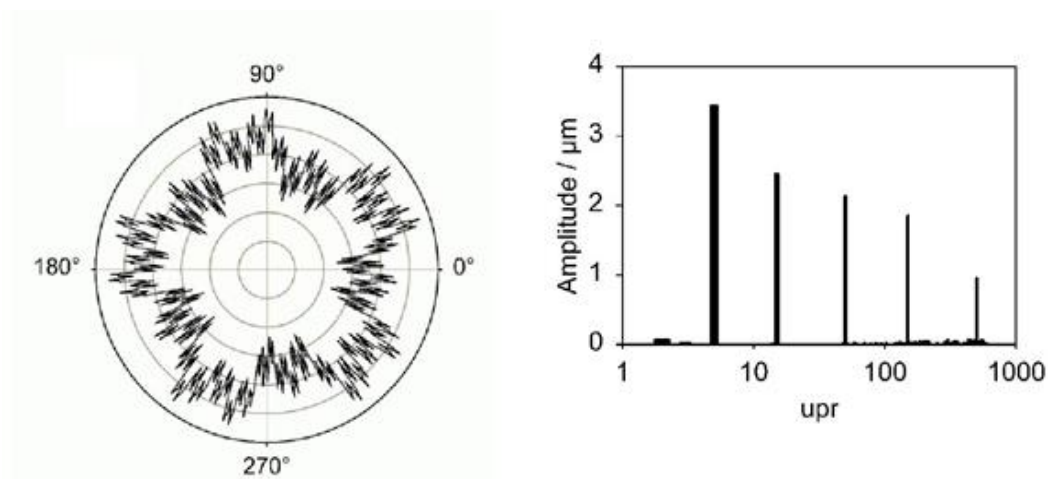
Pomoću zareza (flick) provjerava se pokretljivost, odnosno tromost ticala. Budući da je zarez dubok i naglo se pojavljuje, može se dogoditi da ticalo, ako nije dovoljno pokretljivo, ne uspije pravovremeno detektirati zarez i ne uspije doći u doticaj sa cijelom površinom zareza (ticalo izađe iz zareza prije nego je došlo do vrha zareza). Podatci dobiveni ispitivanjem etalona uspoređuju se s definiranim vrijednostima etalona jer su dimenzije zareza izuzetno dobro poznate. Na temelju odstupanja izmjerenih dimenzija u odnosu na stvarne dimenzije etalona (zareza) dobije se uvid o pokretljivosti ticala.

U mjerenjima kružnosti izbor filtra utječe na rezultate, a to osobito vrijedi za mjerenje Flick etalona. Naime, kod mjerenja kružnosti filtrira se hrapavost. Budući da se zarez prikazuje kao duboka dolina, ona se smanjuje uporabom bilo kojeg filtra.

Flick etalon je svestran jer se pomoću njega može umjeravati nekoliko vrsta mjernih uređaja, kao što su uređaj za ispitivanje kružnosti, uređaj za ispitivanje oblika, koordinatni mjerni stroj i uređaj za mjerenje duljine. Izrada ovakvog etalona je skupa i zahtjevana, a ne postoje gotovi standardizirani etaloni koji se mogu kupiti, tako da LFSB ne posjeduje ovakav tip etalona.

4.2.3 Multi-wave etalon (MWS)

MWS je etalon koji predstavlja prostorno utjelovljenje superpozicije nekoliko sinusoidalnih valova, odakle i dolazi dio naziva „multi-wave“ (više-valni). Valovi mogu biti i na unutarnjem i na vanjskom cilindru. Amplitudni spektar takvog više-valnog etalona sastoji se od linija na utjelovljenim frekvencijama bez signala za druge frekvencije [Slika 14].



Slika 14 Multi-wave etalon [6]

Ispitivanjem ovih etalona i analizom valova koji se nalaze na površini profila provjerava se softverska podrška mjernog sustava, ponajviše harmonijska analiza, odnosno filtracija.

Glavne prednosti MWS-a u odnosu na, npr., Flick etalone su puno bolji omjer signala i šuma te niska osjetljivost na buku u profilima mjernog oblika [6] [7].

Promjenom amplitudnog spektra mogu se izraditi različite izvedbe MWS, odnosno nema točno definiranog standardiziranog etalona. Ponajviše iz razloga što nema masovne proizvodnje ovakvih etalona, nego ih većinom laboratoriji naručuju od proizvođača koji proizvedu točno takav etalon. Zbog cijene i teške dostupnosti LFSB nema ovaj tip etalona.

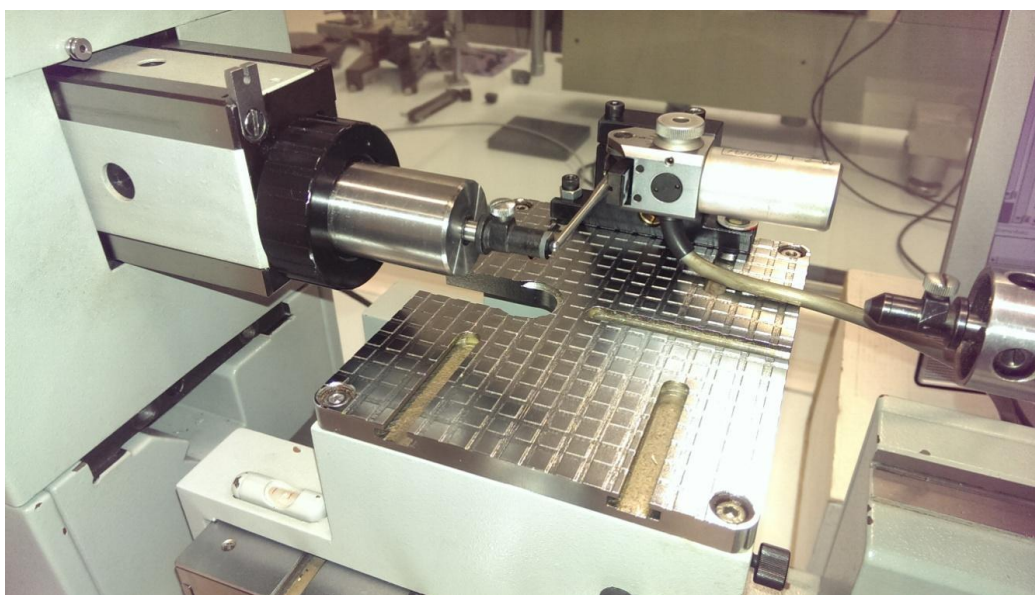
4.3 Umjeravanje u LFSB

Umjeravanje je radnja kojom se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje promatrani mjerni sustav i vrijednosti ostvarenih mjerenjem etalona. Mjerni etaloni koriste se u postupcima umjeravanja jer su precizniji od mjerila koje se umjerava i na višoj su razini hijerarhijske ljestvice sljedivosti. Umjeravanjem se dobije informacija o tome koliko uređaj odstupa od vrijednosti koja bi se dobila mjerenjem primarnog etalona na temelju čega se može utvrditi kako se pokazivanje mjerila može dovesti u vezu s primarnim etalom.

U nastavku je ukratko opisan dosadašnji način umjeravanja uređaja MMQ-3 u LFSB.

4.3.1 Korekcija ticala

Ticalo s uređaja MMQ-3 postavlja se na umjereni univerzalni mjerni uređaj (ULM) Joint Microrep DMS 680. Primjenjuje se ista sila zatezanja i isti nagib kao i na MMQ-3 [Slika 15]. Definiraju se mjerna područja koja će se promatrati te se promatrano mjerno područje podijeli na jednak broj dijelova. Na ULM uređaju miče se ticalo dok se ne dobije očitavanje napona od 0 V (što odgovara $0\text{ }\mu\text{m}$). Zatim se pri pomacima na ULM uređaju unutar promatranog mjernog područja bilježe očitane vrijednosti napona pri tim referentnim pomacima.



Slika 15 Umjeravanje ticala pomoću ULM uređaja

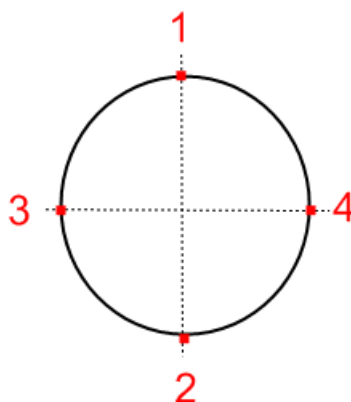
Budući da je ULM uređaj umjeren (osigurana je sljedivost do definicije metra), ideja umjeravanja ticala je da izmjerena vrijednost pomoću ticala bude što bliže referentnoj vrijednosti. To se ostvaruje tako što se izmjereni napon preračuna u mikrometre pomoću koeficijenta korekcije ticala. Koeficijent korekcije ticala je koeficijent nagiba pravca kod kojeg x-os predstavlja vrijednosti referentnog pomaka, a y-os vrijednosti napona koji odgovaraju tim referentnim pomacima. Budući da je odnos referentnih pomaka i napona približno linearan, može se izračunati koeficijent nagiba pravca. Vršiti se više ponavljanja za isto mjerno područje (minimalno tri ponavljanja), za svako mjerenje se izračuna korekcijski faktor te se aritmetička sredina odabire kao korekcijski faktor ticala za to mjerno područje. Reprezentativni korekcijski faktor se unosi u računalo uređaja MMQ-3 za svako mjerno područje.

4.3.2 Umjeravanje ticala

Nakon utvrđivanja korekcije ticala slijedi umjeravanje ticala. Umjeravanje ticala na ULM uređaju vrši se za ista mjerna područja kao kod korekcije ticala. Obavlja se više ponavljanja mjerenja unutar svakog definiranog mjernog područja te se računa srednja vrijednost tih rezultata što predstavlja izmjerenu vrijednost. Potom se računa odstupanje između mjere dobivene mjerenjem pomoću ticala i referentne vrijednosti definirane finim pomakom na ULM uređaju. Postupak se ponavlja za sva mjerna područja, a rezultati se prihvataju ili korigiraju ako je potrebno.

4.3.3 Umjeravanje okretnog stola

Umjeravanje okretnog stola provodi se pomoću referentne polukugle RET 227-509. Početni korak je postavljanje umjerenog ticala na uređaj MMQ-3 u isti položaj kakav je bio pri umjeravanju ticala. Nakon toga iterativnim postupkom centrira se referentna polukugla na okretni stol [Slika 16]. Prvo se okretni stol postavi u početni položaj i očitava se vrijednost na militrone kada je ticalo u dodiru s polukuglom (točka 1). Zatim se okretni stol rotira za 180° (točka 2) pri čemu se očitava vrijednost na militrone te se pomicanjem po translacijskim osima vrši centriranje. Okretni stol zarotira se za 90° (točka 3), očitava se vrijednost, od te točke stol se zarotira za još 180° (točka 4) pri čemu se očitava vrijednost na militrone te se obavi centriranje translacijskim pomakom. Ovaj postupak ponavlja se za više mjernih područja.



Slika 16 Postupak centriranja referentne polukugle

Nakon što je polukugla centrirana na okretnom stolu, ispituje se kružnost istog poprečnog presjeka referentne polukugle u više ponavljanja (najčešće 30). Mjerenje se provodi u najmanjem mjernom području - $\pm 3 \mu\text{m}$. Izračunato odstupanje od kružnosti uspoređuje se s definiranim odstupanjem od kružnosti referentne polukugle.

5. NOVI NAČIN STATIČKOG UMJERAVANJA TICALA

Kod umjeravanja ticala pomoću ULM uređaja ticalo se mora premjestiti sa svog izvornog uređaja, MMQ-3, na ULM uređaj. Pri tome se mora paziti da ticalo na oba uređaja bude pritegnuto istom silom te da je isti kut nagiba ticala kako bi umjeravanje bilo valjano. Zbog umjeravanja se moraju premjestiti i militron i računalo uređaja za mjerenje kružnosti. Naravno, sve ovo iziskuje dosta vremena, napora i opreza kako bi se sve postavilo kako treba te da ne bi došlo do nekih oštećenja prilikom prenošenja. Također je nedostatak kod ULM uređaja postavljanje referentnih vrijednosti. ULM uređaj posjeduje precizni vijak za ostvarivanje jako malih pomaka, no upravljanje tim vijkom je otežano jer se već djelovanjem jako male ručne sile vijak pomiče za znatnu vrijednost. Za ovakvu vrstu umjeravanja potrebno je izuzetno točno postavljanje referentnih vrijednosti (npr. $0,50\text{ }\mu\text{m}$) kako bi rezultati mjerenja bili valjani. Stoga je potrebno dosta preciznosti i strpljenja mjeritelja pri pomicanju vijka za ostvarivanje referentnog pomaka što rezultira dužim vremenskim trajanjem postupka umjeravanja.

Umjeravanjem ticala pomoću piezo aktuatora mogli bi se izbjeći ovi nedostaci. Naime, umjeravanjem pomoću umjerenog aktuatora, piezo aktuator se postavlja na uređaj za mjerenje kružnosti te nema potrebe za premještanjem nikakvih dijelova uređaja. Potrebno je postaviti aktuator na mjesto gdje bi inače bio ispitni uzorak. Referentne vrijednosti zadaju se pomoću računala čime je skraćeno vrijeme ostvarivanja referentnog pomaka.

U nastavku su prikazana umjeravanja pomoću ULM uređaja i pomoću piezo aktuatora te njihova usporedba kako bi se moglo odlučiti je li umjeravanje pomoću piezo aktuatora dovoljno adekvatno da bi se usvojilo kao nova metoda umjeravanja ticala uređaja za mjerenje kružnosti.

5.1 Umjeravanje pomoću univerzalnog mjernog uređaja

Kao što je već opisano u točki 4.3, prvo se ticalo uređaja za mjerenje kružnosti prebaci na univerzalni mjerni uređaj (ULM), kao i militron i računalo MMQ-3 uređaja. Ticalo na ULM uređaju se miče dok se ne dobije očitavanje napona od 0 V, što odgovara vrijednosti od $0\text{ }\mu\text{m}$.

Prvo je odabrano mjerno područje od $\pm 3 \mu\text{m}$ te referentni pomak na ULM uređaju, koji je u ovom slučaju $0,5 \mu\text{m}$. Iako je cijelo mjerno područje od $+3 \mu\text{m}$ do $-3 \mu\text{m}$, mjerenje je obavljeno u rasponu od $+2,50 \mu\text{m}$ do $-2,50 \mu\text{m}$ jer je u rubnim dijelovima mjernog područja veća vjerojatnost pojavljivanja nelinearnosti rezultata mjerenja. Za svaku referentnu vrijednost na ULM uređaju: $2,50 \mu\text{m}$, $2,00 \mu\text{m}$, $1,50 \mu\text{m}$, $1,00 \mu\text{m}$, $0,50 \mu\text{m}$, $0,00 \mu\text{m}$, $-0,50 \mu\text{m}$, $-1,00 \mu\text{m}$, $-1,50 \mu\text{m}$, $-2,00 \mu\text{m}$ i $-2,50 \mu\text{m}$ očitava se iznos napona za tu referentnu vrijednost. Postupak se ponovi tri puta. Za svako mjerenje izračuna se faktor korekcije ticala, a kao reprezentativni koeficijent korekcije ticala za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$ odabire se aritmetička sredina korekcijskih faktora [Tablica 3].

Tablica 3 Podatci mjerenja na ULM uređaju za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$

Referentna vrijednost [μm]	Iznos izmjerenog napona [V]		
	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje
2,50	6,22	6,13	6,08
2,00	5,12	4,89	4,87
1,50	3,97	3,90	3,72
1,00	2,72	2,65	2,63
0,50	1,45	1,39	1,33
0,00	0,00	0,00	0,00
-0,50	-1,35	-1,17	-1,28
-1,00	-2,60	-2,44	-2,55
-1,50	-3,75	-3,57	-3,75
-2,00	-5,02	-4,83	-5,01
-2,50	-6,37	-6,10	-6,31
Korekcijski faktor ticala [$\text{V}/\mu\text{m}$]	2,5475	2,4578	2,4882
Reprezentativni koeficijent korekcije ticala [$\text{V}/\mu\text{m}$]	2,4978		

Za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$ odabrani referentni pomak na ULM uređaju iznosi $2 \mu\text{m}$. Iznos napona očitava se za svaku referentnu vrijednost: $8,00 \mu\text{m}$, $6,00 \mu\text{m}$, $4,00 \mu\text{m}$, $2,00 \mu\text{m}$, $0,00 \mu\text{m}$, $-2,00 \mu\text{m}$, $-4,00 \mu\text{m}$, $-6,00 \mu\text{m}$ i $-8,00 \mu\text{m}$. Za svako od tri ponovljena mjerenja izračuna se koeficijent nagiba pravca, odnosno korekcijski faktor te se odabere aritmetička sredina tih korekcijskih faktora [Tablica 4].

Tablica 4 Podatci mjerenja na ULM uređaju za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$

Referentna vrijednost [μm]	Iznos izmjerenog napona [V]		
	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje
8,00	3,99	4,01	4,00
6,00	3,02	3,01	3,00
4,00	1,98	2,00	1,97
2,00	0,99	0,99	0,97
0,00	0,00	0,00	0,00
-2,00	-1,01	-1,01	-1,00
-4,00	-1,97	-2,04	-2,00
-6,00	-3,01	-3,05	-3,04
-8,00	-4,02	-4,06	-4,03
Korekcijski faktor ticala [$\text{V}/\mu\text{m}$]	0,5003	0,5045	0,5013
Reprezentativni koeficijent korekcije ticala [$\text{V}/\mu\text{m}$]	0,5020		

Za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$ odabrani referentni pomak iznosi $5 \mu\text{m}$. Za svaku referentnu vrijednost na ULM uređaju: $25,00 \mu\text{m}$, $20,00 \mu\text{m}$, $15,00 \mu\text{m}$, $10,00 \mu\text{m}$, $5,00 \mu\text{m}$, $0,00 \mu\text{m}$, $-5,00 \mu\text{m}$, $-10,00 \mu\text{m}$, $-15,00 \mu\text{m}$, $-20,00 \mu\text{m}$ i $-25,00 \mu\text{m}$ očitava se iznos napona za tu referentnu vrijednost. Mjerenje se ponovi tri puta te se za svako mjerenje izračuna korekcijski faktor ticala. Za reprezentativni koeficijent korekcije ticala za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$ odabire se aritmetička sredina korekcijskih faktora [Tablica 5].

Tablica 5 Podatci mjerenje na ULM uređaju za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$

Referentna vrijednost [μm]	Iznos izmjerenog napona [V]		
	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje
25,00	6,31	6,33	6,36
20,00	5,02	5,04	5,07
15,00	3,79	3,80	3,82
10,00	2,51	2,53	2,56
5,00	1,26	1,29	1,30
0,00	0,00	0,00	0,00
-5,00	-1,22	-1,24	-1,23
-10,00	-2,51	-2,50	-2,51
-15,00	-3,75	-3,75	-3,77
-20,00	-5,01	-5,03	-5,04
-25,00	-6,27	-6,22	-6,28
Korekcijski faktor ticala [$\text{V}/\mu\text{m}$]	0,2512	0,2514	0,2529
Reprezentativni koeficijent korekcije ticala [$\text{V}/\mu\text{m}$]	0,2518		

5.2 Umjeravanje pomoću piezo aktuatora

5.2.1 Piezo aktuator

Piezo aktuator radi na principu piezoelektriciteta. Piezoelektricitet je električni naboj koji se akumulira u određenim čvrstim materijalima koji nastaje kao odgovor na primijenjeno mehaničko opterećenje. Dakle, piezoelektrični materijali (razni kristali, keramika) se šire ili skupljaju proporcionalno dovedenom naponu. Okarakterizirani su njihovom osjetljivošću, odnosno omjerom pomaka materijala u odnosu na dovedeni napon. Piezoelektrični materijali pokazuju veću osjetljivost na početku mjerenju, nego na kraju. To uzrokuje određenu histerezu kada se mjeri u suprotnim smjerovima. Histereza se može ispraviti primjenom nelinearne promjene napona. Osjetljivost piezoelektričnih materijala se eksponencijalno smanjuje s vremenom. Najveće promjene u osjetljivosti događaju se pri prvim korištenjima, dok se s prolaskom vremena promjene smanjuju te piezoelektrični materijal postaje stabilniji.

Korišteni piezo aktuator proizvođača „Pi“ kojeg posjeduje LFSB sastoji se od piezo „stage“ P-621.ZCD i piezo kontrolera E-625.CR.

Piezo stage P-621.ZCD [Slika 17] s ugrađenim kapacitivnim senzorom može izvršiti pomak u smjeru z-osi s rasponom vertikalnog pomaka do 100 μm i rezolucijom ispod nanometra. Kapacitivni senzori mjere položaj izravno i bez kontakta, što povećava točnost pozicioniranja. Piezo stage izuzetno je precizan uz točnost pozicioniranja od 0,02 % koju može postići za nekoliko desetaka milisekundi. Izrađen je od aluminija i teži 0,17 kg, dimenzije mu iznose 40 mm x 40 mm x 17,5 mm, dok se raspon temperature pri kojoj se koristi kreće od -20 °C do 80 °C [8].



Slika 17 Piezo stage P-621.ZCD [8]

Kontroler E-625.CR [Slika 18] je laboratorijski uređaj primjenjiv za uređaje s kapacitivnim opterećenjem, kao što je piezo aktuator. Može se koristiti za statičku i dinamičku primjenu. Modul E-625.CR opremljen je E-816 podskupom računalnog sučelja. To mu omogućuje da se nekoliko E-625.CR uređaja može kontrolirati s jednog sučelja te da korisnik može pohraniti sve funkcijske vrijednosti u unutarnju tablicu i jednostavno doći do izlaznih podataka. Piezo stage je povezan s kontrolerom koji se priključi na računalo [9].



Slika 18 Piezo servo kontroler E-625.CR [9]

5.2.2 Postupak umjeravanja

Za mjerenje pomoću piezo aktuatora, potrebno je isti postaviti na odgovarajuće mjesto na MMQ-3 uređaju [Slika 19]. Aktuator je u ulozi ispitnog uzorka pa treba biti na okretnom stolu. Budući da ticalo miruje, a piezo aktuator uzrokuje pomakom otklon ticala, okretni stol treba mirovati kako bi i aktuator mogao mirovati. Jedine sile koje bi mogle uzrokovati pomak okretnog stola za vrijeme mjerenja su sile kontakta između pomične površine aktuatora i vrha ticala. Te sile su izuzetno malog iznosa, no za sigurnost od pomaka postavljena su dva magnetna držača na suprotnim stranama stola te je tako eliminirana mogućnost zakreta stola koja bi mogla utjecati na ponovljivost rezultata mjerenja. Na okretni stol postavlja se prijenosni stol koji služi za reguliranje položaja aktuatora u odnosu na ticalo. Prijenosni stol može obavljati translaciju po x-osi i y-osi te rotaciju oko aksijalne osi malih iznosa kuta pomaka. Na prijenosni stol se stavlja držač na čijem podnožju se nalazi magnet kojim se držač pričvrsti za prijenosni stol. Na vertikalnoj pločici držača nalazi se više provrta različitih promjera te se aktuator pričvrsti na držač pomoću vijaka i matica. Koristi se ovakav oblik držača jer aktuator mora biti u vertikalnom položaju pri mjerenju. Plastelinom se pričvrste prijenosni stol na okretni stol te magnetna pločica na prijenosni stol. Ovako stabilan i krut sustav ne treba biti postavljen u centru rotacije okretnog stola jer stol miruje. Položaj ticala se namješta pomoću vertikalnog i horizontalnog pomaka na vertikalnom stupu uređaja i ruci ticala, dok se položaj aktuatora u odnosu na vrh ticala namješta pomacima prijenosnog stola.



Slika 19 Postavljanje piezo aktuatora na MMQ-3 uređaj

Nakon što su namješteni položaj aktuatora i ticala, može se početi s postupkom mjerenja. Prvo se mjeri u mjernom području $\pm 3 \mu\text{m}$. Aktuatoru se šalju naredbe pomoću računala za referentni pomak od $0,50 \mu\text{m}$. Tako se očitavaju naponi za iste referentne vrijednosti kao kod ULM uređaja: $2,50 \mu\text{m}$, $2,00 \mu\text{m}$, $1,50 \mu\text{m}$, $1,00 \mu\text{m}$, $0,50 \mu\text{m}$, $0,00 \mu\text{m}$, $-0,50 \mu\text{m}$, $-1,00 \mu\text{m}$, $-1,50 \mu\text{m}$, $-2,00 \mu\text{m}$ i $-2,50 \mu\text{m}$. Zbog ovakvog redoslijeda referentnih vrijednosti, pomoću uređaja MMQ-3 za referentnu vrijednost $2,50 \mu\text{m}$ očitava se vrijednost od $2,50 \mu\text{m}$, dok se za ostale referentne vrijednosti očitana vrijednost razlikuje. Ovaj način mjerenja odabran je iz razloga kako bi se osiguralo da pomak aktuatora bude u smjeru sile ticanja. Naime, induktivno ticalo u sebi sadrži mehaničku oprugu koja se ponaša kao prigušenje ukoliko na njega djeluje sila piezo pomaka. S obzirom da se piezo pomak ostvaruje u izuzetno kratkom vremenu, ovakav sustav predstavlja dinamički sustav u kojem može doći do pojave vibracija. Stoga su rezultati mjerenja translaterani kako bi za referentnu vrijednost $0,00 \mu\text{m}$ bilo prikazano očitavanje od $0,00 \mu\text{m}$. Izmjerene vrijednosti napona su također translaterane. Postupak se ponavlja u 2 seta (A i B) po 3 mjerenja zbog lakše usporedbe s rezultatima mjerenja pomoću ULM uređaja, odnosno ukupno 6 mjerenja. Postupak određivanja faktora korekcije ticala isti je kao kod ULM uređaja [Tablica 6].

Tablica 6 Podatci mjerenja pomoću piezo aktuatora za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$

Referentna vrijednost [μm]	Iznos izmjerenog napona [V]					
	A			B		
	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje
2,50	6,53	6,53	6,40	6,44	6,52	6,49
2,00	5,23	5,23	5,11	5,15	5,20	5,19
1,50	3,93	3,90	3,83	3,86	3,92	3,88
1,00	2,64	2,62	2,55	2,57	2,60	2,60
0,50	1,34	1,30	1,28	1,28	1,29	1,28
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,50	-1,32	-1,30	-1,26	-1,29	-1,32	-1,27
-1,00	-2,65	-2,63	-2,54	-2,58	-2,63	-2,56
-1,50	-3,99	-3,91	-3,83	-3,87	-3,93	-3,83
-2,00	-5,32	-5,22	-5,12	-5,16	-5,22	-5,12
-2,50	-6,61	-6,53	-6,40	-6,46	-6,51	-6,41
Korekcijski faktor ticala [$\text{V}/\mu\text{m}$]	2,6345	2,6115	2,5567	2,5782	2,6082	2,5771
Reprezentativni koeficijent korekcije ticala [$\text{V}/\mu\text{m}$]	2,5944					

Za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$ odabrani referentni pomak piezo aktuatora isti je kao na ULM uređaju, a iznosi $2 \mu\text{m}$. Iznos napona očita se za svaku referentnu vrijednost: $8,00 \mu\text{m}$, $6,00 \mu\text{m}$, $4,00 \mu\text{m}$, $2,00 \mu\text{m}$, $0,00 \mu\text{m}$, $-2,00 \mu\text{m}$, $-4,00 \mu\text{m}$, $-6,00 \mu\text{m}$ i $-8,00 \mu\text{m}$. Za svako mjerenje izračuna se koeficijent nagiba pravca, odnosno korekcijski faktor te se odabere aritmetička sredina tih korekcijskih faktora [Tablica 7].

Tablica 7 Podatci mjerenja pomoću piezo aktuatora za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$

Referentna vrijednost [μm]	Iznos izmjerene napona [V]					
	A			B		
	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje
8,00	4,12	4,11	4,11	4,10	4,12	4,11
6,00	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,09
4,00	2,05	2,06	2,05	2,05	2,06	2,06
2,00	1,03	1,02	1,03	1,03	1,03	1,02
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-2,00	-1,03	-1,03	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02
-4,00	-2,04	-2,05	-2,04	-2,04	-2,04	-2,04
-6,00	-3,06	-3,07	-3,06	-3,07	-3,07	-3,06
-8,00	-4,08	-4,09	-4,08	-4,09	-4,09	-4,08
Korekcijski faktor ticala [$\text{V}/\mu\text{m}$]	0,5122	0,5127	0,5118	0,5120	0,5128	0,5121
Reprezentativni koeficijent korekcije ticala [$\text{V}/\mu\text{m}$]	0,5123					

Za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$ odabrani referentni pomak iznosi $5 \mu\text{m}$. Za svaku referentnu vrijednost piezo aktuatora: $25,00 \mu\text{m}$, $20,00 \mu\text{m}$, $15,00 \mu\text{m}$, $10,00 \mu\text{m}$, $5,00 \mu\text{m}$, $0,00 \mu\text{m}$, $-5,00 \mu\text{m}$, $-10,00 \mu\text{m}$, $-15,00 \mu\text{m}$, $-20,00 \mu\text{m}$ i $-25,00 \mu\text{m}$ očitava se iznos napona za tu referentnu vrijednost. Mjerenje se ponovi šest puta te se za svako mjerenje izračuna korekcijski faktor ticala. Za reprezentativni koeficijent korekcije ticala za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$ odabire se aritmetička sredina korekcijskih faktora [Tablica 8].

Tablica 8 Podatci mjerenja pomoću piezo aktuatora za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$

Referentna vrijednost [μm]	Iznos izmjerenog napona [V]					
	A			B		
	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje
25,00	6,36	6,36	6,38	6,38	6,36	6,35
20,00	5,07	5,07	5,08	5,09	5,08	5,07
15,00	3,80	3,80	3,81	3,82	3,80	3,80
10,00	2,53	2,54	2,54	2,54	2,54	2,53
5,00	1,26	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-5,00	-1,28	-1,27	-1,27	-1,26	-1,28	-1,27
-10,00	-2,54	-2,54	-2,54	-2,53	-2,53	-2,54
-15,00	-3,81	-3,81	-3,82	-3,80	-3,80	-3,80
-20,00	-5,08	-5,08	-5,08	-5,07	-5,07	-5,07
-25,00	-6,35	-6,35	-6,35	-6,34	-6,35	-6,34
Korekcijski faktor ticala [$\text{V}/\mu\text{m}$]	0,2539	0,2540	0,2543	0,2541	0,2539	0,2536
Reprezentativni koeficijent korekcije ticala [$\text{V}/\mu\text{m}$]	0,2540					

5.3 Usporedba dviju metoda umjeravanja

Usporedba rezultata umjeravanja pomoću ULM uređaja i pomoću piezo aktuatora prikazana je za svako mjerno područje odvojeno.

5.3.1 Mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$

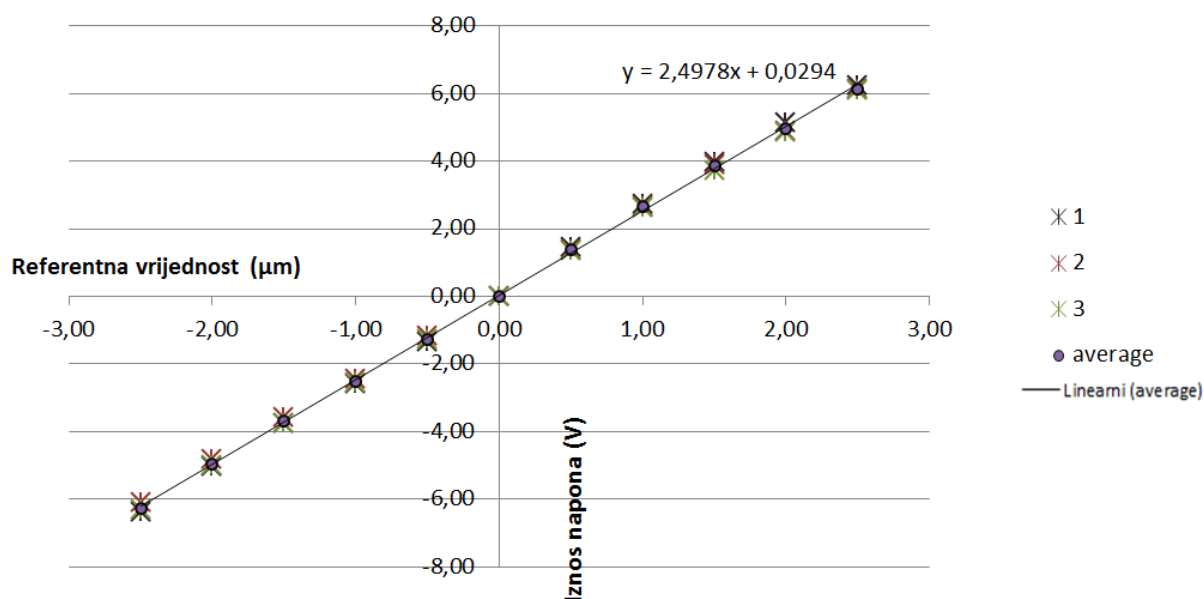
Za izmjerene napone pomoću ULM uređaja i piezo aktuatora računa se njihovo rasipanje. Rasipanje u ovom slučaju predstavlja raspon R - apsolutna vrijednost razlike najvećeg i najmanjeg napona za određenu referentnu vrijednost. Prikazana su rasipanja od tri mjerenja na ULM uređaju („ULM“), od dva seta po tri mjerenja pomoću piezo aktuatora („A“ i „B“) te aritmetička sredina rasipanja od setova mjerenja A i B („A i B“) [Tablica 9].

Tablica 9 Rasipanja napona za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$

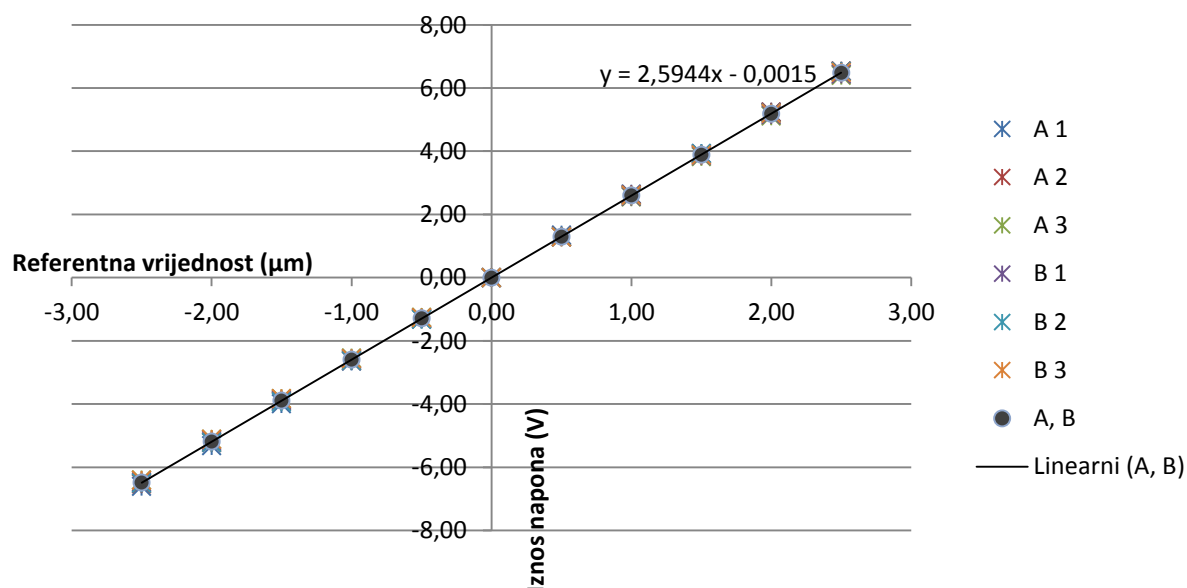
Referentna vrijednost $[\mu\text{m}]$	Raspon [V]			
	ULM	Piezo aktuator		
		A	B	A i B
2,50	0,14	0,13	0,08	0,11
2,00	0,25	0,12	0,05	0,09
1,50	0,25	0,10	0,06	0,08
1,00	0,09	0,09	0,03	0,06
0,50	0,12	0,06	0,01	0,04
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,50	0,18	0,06	0,05	0,06
-1,00	0,16	0,11	0,07	0,09
-1,50	0,18	0,16	0,10	0,13
-2,00	0,19	0,20	0,10	0,15
-2,50	0,27	0,21	0,10	0,16
Najveće rasipanje R	0,27	0,21	0,10	0,16

Na temelju podataka o rasipanju može se vidjeti da se najveće rasipanje napona (0,27 V) pojavljuje pri jednom od mjerenja na ULM uređaju, kao i da su sva rasipanja veća kod mjerenja pomoću ULM uređaja. Iako razlike nisu velike, mjerenje pomoću piezo aktuatora pokazuje veću preciznost i ponovljivost rezultata mjerenja.

Slika 20 i Slika 21 prikazuju grafički prikaz linearnog odnosa referentnih vrijednosti i izmjerenog napona pri tim referentnim vrijednostima. Graf za mjerenje pomoću ULM uređaja izrađen je na temelju već navedenih rezultata mjerenja [Tablica 3] za svako mjerenje posebno (1, 2, 3) te za aritmetičku sredinu rezultata mjerenja (average). Analogno tome izrađen je i prikaz mjerenja pomoću piezo aktuatora za svako mjerenje posebno (A1, A2, A3, B1, B2, B3), kao i za aritmetičku sredinu rezultata mjerenja (A, B).



Slika 20 Odnos referentne vrijednosti i napona za mjerenje pomoću ULM uređaja za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$



Slika 21 Odnos referentne vrijednosti i napona za mjerenje pomoću piezo aktuatora za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$

Usporedbom ova dva grafička prikaza [Slika 20 i Slika 21] vidljivo je da se na prvom grafu pojavljuju veća rasipanja napona za određenu referentnu vrijednost te veća odstupanja od linearnosti na pojedinim odsječcima linije, kao i da je različit kut nagiba linija.

Tablično su prikazana odstupanja pojedinačnih izmjerenih vrijednosti od referentnih vrijednosti i odstupanja aritmetičkih sredina od referentnih vrijednosti za mjerenja pomoću ULM uređaja [Tablica 10], za mjerenja pomoću piezo aktuatora za A set mjerenja [

Tablica 11], za mjerenja pomoću piezo aktuatora za B set mjerenja [Tablica 12] te odstupanja aritmetičkih sredina od referentnih vrijednosti za mjerenja pomoću piezo aktuatora [Tablica 13]. Sve vrijednosti prikazane su u mikrometrima.

Tablica 10 Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću ULM uređaja za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$

ULM								
Referentna vrijednost [μm]	1.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	2.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	3.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	1.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	2.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	3.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	Aritmetička sredina od 3 mjerenja [μm]	Odstupanje aritmetičke sredine od referentne vrijednosti [μm]
2,50	2,49	2,45	2,43	-0,01	-0,05	-0,07	2,46	-0,04
2,00	2,05	1,96	1,95	0,05	-0,04	-0,05	1,99	-0,01
1,50	1,59	1,56	1,49	0,09	0,06	-0,01	1,55	0,05
1,00	1,09	1,06	1,05	0,09	0,06	0,05	1,07	0,07
0,50	0,58	0,56	0,53	0,08	0,06	0,03	0,56	0,06
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,50	-0,54	-0,47	-0,51	-0,04	0,03	-0,01	-0,51	-0,01
-1,00	-1,04	-0,98	-1,02	-0,04	0,02	-0,02	-1,01	-0,01
-1,50	-1,50	-1,43	-1,50	0,00	0,07	0,00	-1,48	0,02
-2,00	-2,01	-1,93	-2,01	-0,01	0,07	-0,01	-1,98	0,02
-2,50	-2,55	-2,44	-2,53	-0,05	0,06	-0,03	-2,51	-0,01

Tablica 11 Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja A) za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$

Piezo aktuator								
A								
Referentna vrijednost [μm]	1.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	2.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	3.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	1.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	2.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	3.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	Aritmetička sredina od 3 mjerenja [μm]	Odstupanje aritmetičke sredine od referentne vrijednosti [μm]
2,50	2,52	2,52	2,47	0,02	0,02	-0,03	2,50	0,00
2,00	2,02	2,02	1,97	0,02	0,02	-0,03	2,00	0,00
1,50	1,51	1,50	1,48	0,01	0,00	-0,02	1,50	0,00
1,00	1,02	1,01	0,98	0,02	0,01	-0,02	1,00	0,00
0,50	0,52	0,50	0,49	0,02	0,00	-0,01	0,50	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,50	-0,51	-0,50	-0,49	-0,01	0,00	0,01	-0,50	0,00
-1,00	-1,02	-1,01	-0,98	-0,02	-0,01	0,02	-1,00	0,00
-1,50	-1,54	-1,51	-1,48	-0,04	-0,01	0,02	-1,51	-0,01
-2,00	-2,05	-2,01	-1,97	-0,05	-0,01	0,03	-2,01	-0,01
-2,50	-2,55	-2,52	-2,47	-0,05	-0,02	0,03	-2,51	-0,01

Tablica 12 Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja B) za mjereno područje $\pm 3 \mu\text{m}$

Piezo aktuator								
B								
Referentna vrijednost [μm]	1.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	2.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	3.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	1.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	2.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	3.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	Aritmetička sredina od 3 mjerenja [μm]	Odstupanje aritmetičke sredine od referentne vrijednosti [μm]
2,50	2,48	2,51	2,50	-0,02	0,01	0,00	2,50	0,00
2,00	1,99	2,00	2,00	-0,01	0,00	0,00	2,00	0,00
1,50	1,49	1,51	1,50	-0,01	0,01	0,00	1,50	0,00
1,00	0,99	1,00	1,00	-0,01	0,00	0,00	1,00	0,00
0,50	0,49	0,50	0,49	-0,01	0,00	-0,01	0,49	-0,01
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,50	-0,50	-0,51	-0,49	0,00	-0,01	0,01	-0,50	0,00
-1,00	-0,99	-1,01	-0,99	0,01	-0,01	0,01	-1,00	0,00
-1,50	-1,49	-1,51	-1,48	0,01	-0,01	0,02	-1,49	0,01
-2,00	-1,99	-2,01	-1,97	0,01	-0,01	0,03	-1,99	0,01
-2,50	-2,49	-2,51	-2,47	0,01	-0,01	0,03	-2,49	0,01

Tablica 13 Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja A i B) za mjereno područje $\pm 3 \mu\text{m}$

Piezo aktuator		
A, B		
Referentna vrijednost [μm]	Aritmetička sredina od 6 mjerenja [μm]	Odstupanje aritmetičke sredine od referentne vrijednosti [μm]
2,50	2,50	0,00
2,00	2,00	0,00
1,50	1,50	0,00
1,00	1,00	0,00
0,50	0,50	0,00
0,00	0,00	0,00
-0,50	-0,50	0,00
-1,00	-1,00	0,00
-1,50	-1,50	0,00
-2,00	-2,00	0,00
-2,50	-2,50	0,00

Iz tablica se može vidjeti da se veća odstupanja izmjerenih od referentnih vrijednosti pojavljuju kod mjerenja pomoću ULM uređaja nego kod mjerenja pomoću piezo aktuatora. To se najbolje vidi iz rezultata odstupanja aritmetičkih sredina od referentnih vrijednosti. Tako je kod mjerenja pomoću ULM uređaja najveće odstupanje 0,07 μm , dok su za mjerenja pomoću piezo aktuatora najveća odstupanja 0,01 μm , a čak se najčešće pojavljuje odstupanje od 0,00 μm , odnosno nema odstupanja aritmetičke sredine od referentne vrijednosti za ovu razinu točnosti.

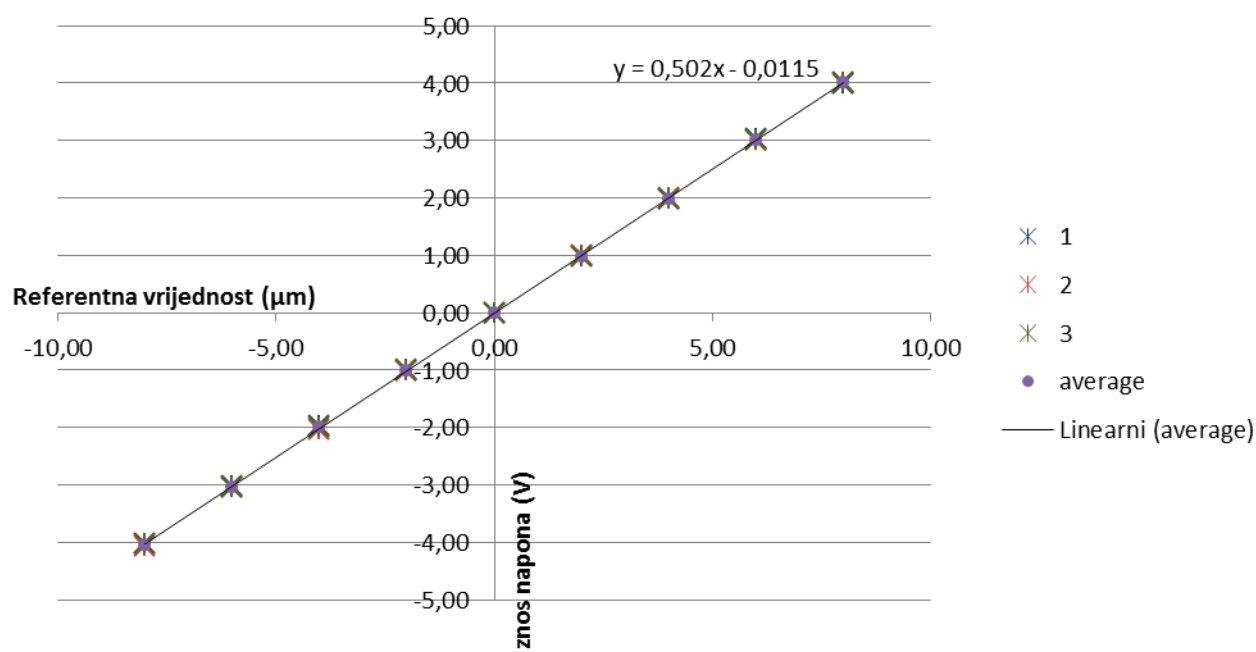
5.3.2 Mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$

Analogno prikazu rezultata za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$, u nastavku su prikazane obrade rezultata mjerenja za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$ za mjerenja pomoću ULM uređaja te za mjerenja pomoću piezo aktuatora.

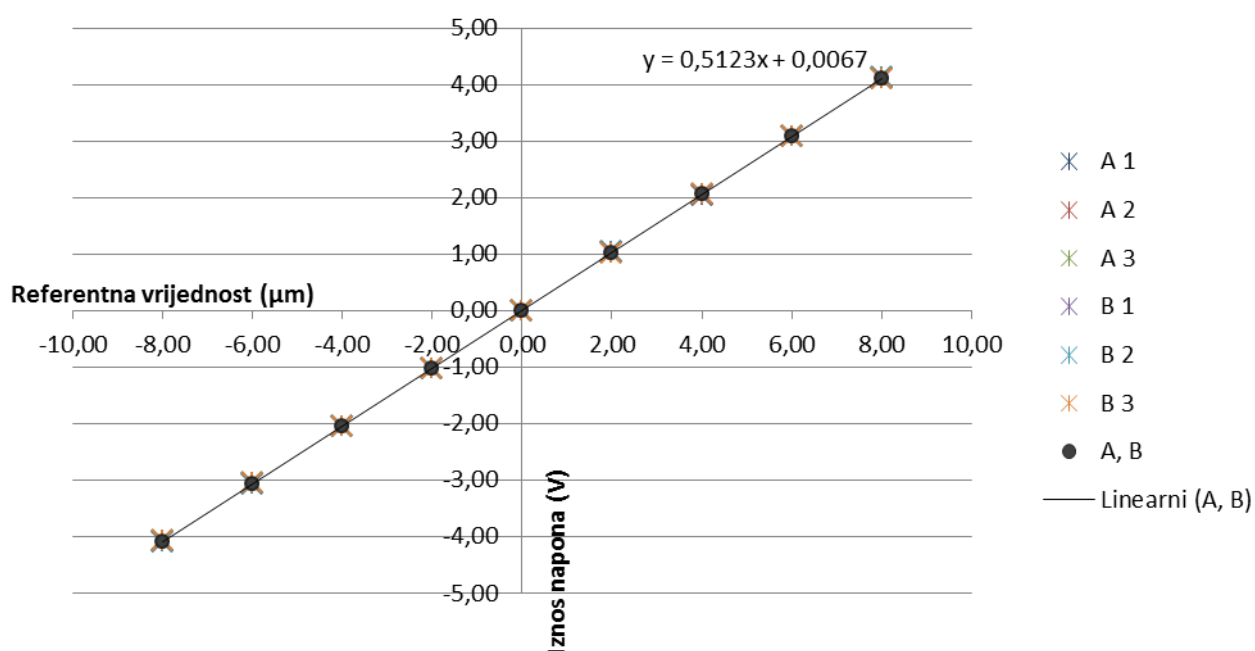
Tablica 14 Rasipanja napona za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$

Referentna vrijednost [μm]	Raspon [V]			
	ULM	Piezo aktuator		
		A	B	A i B
8,00	0,02	0,01	0,02	0,02
6,00	0,02	0,00	0,01	0,01
4,00	0,03	0,01	0,01	0,01
2,00	0,02	0,01	0,01	0,01
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-2,00	0,01	0,01	0,00	0,01
-4,00	0,07	0,01	0,00	0,01
-6,00	0,04	0,01	0,01	0,01
-8,00	0,04	0,01	0,01	0,01
Najveće rasipanje R	0,07	0,01	0,02	0,02

Iznosi rasipanja izračunati su na temelju prethodnih rezultata mjerenja napona [Tablica 4 i Tablica 7]. Najveće rasipanje napona (0,07 V) pojavljuje se kod mjerenja pomoću ULM uređaja, dok su kod mjerenja pomoću piezo aktuatora manja odstupanja (0,01 V i 0,02 V). Iz rezultata se zaključuje da za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$ mjerenje pomoću aktuatora pokazuje veću preciznost i ponovljivost rezultata mjerenja za iste referentne vrijednosti.



Slika 22 Odnos referentne vrijednosti i napona za mjerenje pomoću ULM uređaja za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$



Slika 23 Odnos referentne vrijednosti i napona za mjerenje pomoću piezo aktuatora za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$

Za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$ pomoću grafičkih prikaza [Slika 22 i Slika 23] može se primijetiti da rasipanja napona za određene referentne vrijednosti nisu velika te da su nagibi linija približno jednaki, odnosno da su koeficijenti korekcije ticala sličnih iznosa.

Tablica 15 Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću ULM uređaja za mjerno područje $\pm 10\mu\text{m}$

ULM								
Referentna vrijednost [μm]	1.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	2.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	3.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	1.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	2.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	3.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	Aritmetička sredina od 3 mjerenja [μm]	Odstupanje aritmetičke sredine od referentne vrijednosti [μm]
8,00	7,95	7,99	7,97	-0,05	-0,01	-0,03	7,97	-0,03
6,00	6,02	6,00	5,98	0,02	0,00	-0,02	6,00	0,00
4,00	3,94	3,98	3,92	-0,06	-0,02	-0,08	3,95	-0,05
2,00	1,97	1,97	1,93	-0,03	-0,03	-0,07	1,96	-0,04
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-2,00	-2,01	-2,01	-1,99	-0,01	-0,01	0,01	-2,01	-0,01
-4,00	-3,92	-4,06	-3,98	0,08	-0,06	0,02	-3,99	0,01
-6,00	-6,00	-6,08	-6,06	0,00	-0,08	-0,06	-6,04	-0,04
-8,00	-8,01	-8,09	-8,03	-0,01	-0,09	-0,03	-8,04	-0,04

Tablica 16 Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja A) za mjerno područje $\pm 10\mu\text{m}$

Piezo aktuator								
A								
Referentna vrijednost [μm]	1.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	2.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	3.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	1.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	2.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	3.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	Aritmetička sredina od 3 mjerenja [μm]	Odstupanje aritmetičke sredine od referentne vrijednosti [μm]
8,00	8,04	8,02	8,02	0,04	0,02	0,02	8,03	0,03
6,00	6,01	6,01	6,01	0,01	0,01	0,01	6,01	0,01
4,00	4,00	4,02	4,00	0,00	0,02	0,00	4,01	0,01
2,00	2,01	1,99	2,01	0,01	-0,01	0,01	2,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-2,00	-2,01	-2,01	-1,99	-0,01	-0,01	0,01	-2,00	0,00
-4,00	-3,98	-4,00	-3,98	0,02	0,00	0,02	-3,99	0,01
-6,00	-5,97	-5,99	-5,97	0,03	0,01	0,03	-5,98	0,02
-8,00	-7,96	-7,98	-7,96	0,04	0,02	0,04	-7,97	0,03

Tablica 17 Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja B) za mjereno područje $\pm 10 \mu\text{m}$

Piezo aktuator								
B								
Referentna vrijednost [μm]	1.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	2.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	3.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	1.mjerenje; Odstupanje Izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	2.mjerenje; Odstupanje Izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	3.mjerenje; Odstupanje Izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	Aritmetička sredina od 3 mjerenja [μm]	Odstupanje aritmetičke sredine od referentne vrijednosti [μm]
8,00	8,00	8,04	8,02	0,00	0,04	0,02	8,02	0,02
6,00	6,01	6,01	6,03	0,01	0,01	0,03	6,02	0,02
4,00	4,00	4,02	4,02	0,00	0,02	0,02	4,01	0,01
2,00	2,01	2,01	1,99	0,01	0,01	-0,01	2,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-2,00	-1,99	-1,99	-1,99	0,01	0,01	0,01	-1,99	0,01
-4,00	-3,98	-3,98	-3,98	0,02	0,02	0,02	-3,98	0,02
-6,00	-5,99	-5,99	-5,97	0,01	0,01	0,03	-5,99	0,01
-8,00	-7,98	-7,98	-7,96	0,02	0,02	0,04	-7,98	0,02

Tablica 18 Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja A i B) za mjereno područje $\pm 10 \mu\text{m}$

Piezo aktuator		
A, B		
Referentna vrijednost [μm]	Aritmetička sredina od 6 mjerenja [μm]	Odstupanje aritmetičke sredine od referentne vrijednosti [μm]
8,00	8,03	0,03
6,00	6,02	0,02
4,00	4,01	0,01
2,00	2,00	0,00
0,00	0,00	0,00
-2,00	-2,00	0,00
-4,00	-3,99	0,01
-6,00	-5,98	0,02
-8,00	-7,97	0,03

Rezultati sadržani u tablicama za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$

Tablica 15, Tablica 16, Tablica 17, Tablica 18] prikazuju da se kod mjerenja pomoću ULM uređaja pojavljuju veća odstupanja izmjerenih od referentnih vrijednosti.

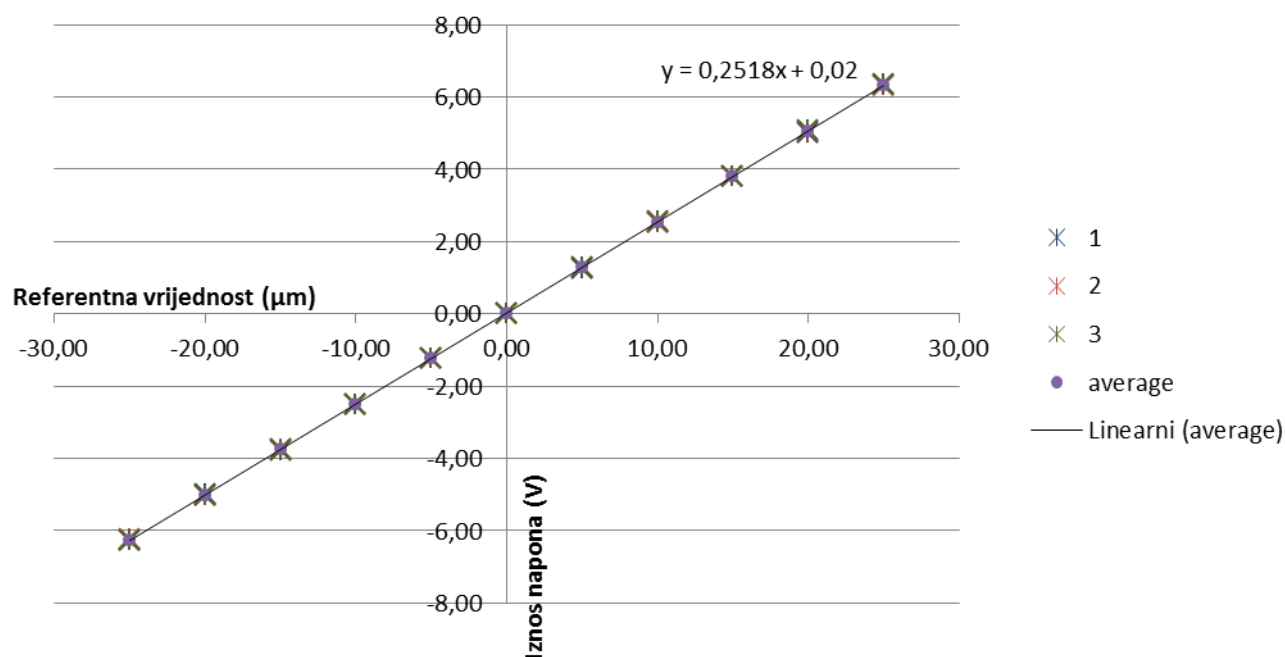
5.3.3 Mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$

Kao i za prethodna mjerna područja, na isti princip su prikazani obrađeni rezultati mjerenja za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$.

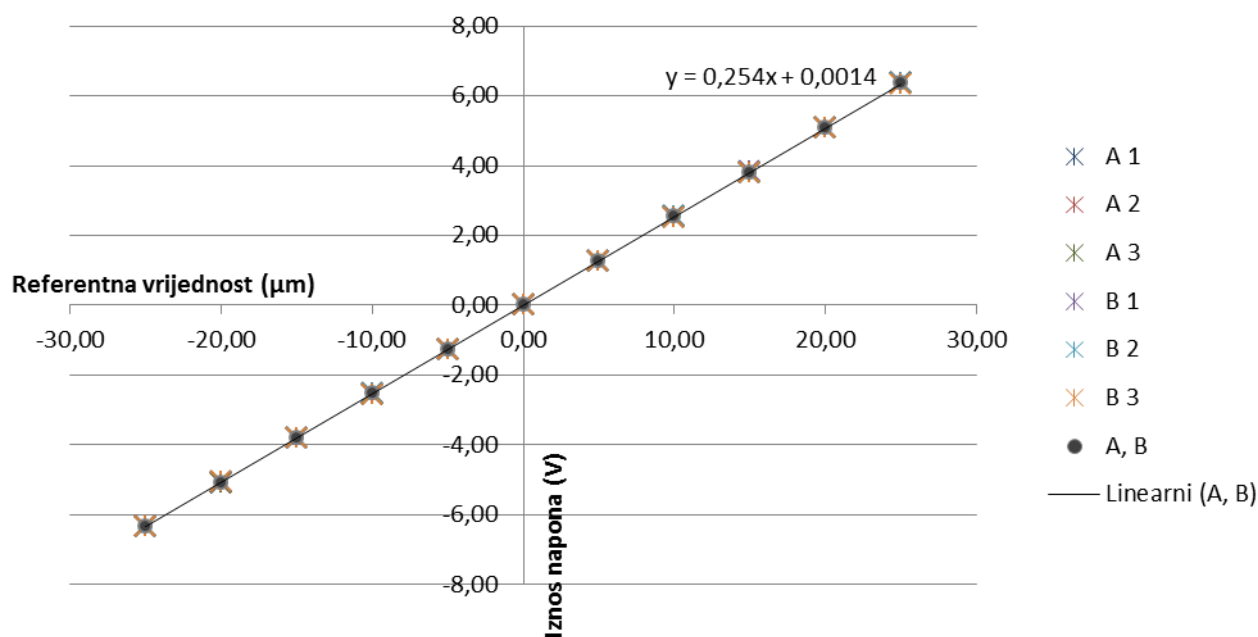
Tablica 19 Rasipanja napona za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$

Referentna vrijednost [μm]	Raspon [V]			
	ULM	Piezo aktuator		
		A	B	A i B
25,00	0,05	0,02	0,03	0,03
20,00	0,05	0,01	0,02	0,02
15,00	0,03	0,01	0,02	0,02
10,00	0,05	0,01	0,01	0,01
5,00	0,04	0,01	0,00	0,01
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-5,00	0,02	0,01	0,02	0,02
-10,00	0,01	0,00	0,01	0,01
-15,00	0,02	0,01	0,00	0,01
-20,00	0,03	0,00	0,00	0,00
-25,00	0,06	0,00	0,01	0,01
Najveće rasipanje <i>R</i>	0,06	0,02	0,03	0,03

Iznosi rasipanja izračunati su na temelju prethodnih rezultata mjerenja napona [Tablica 5 i Tablica 8]. Dok je iznos najvećeg rasipanja za mjerenje pomoću piezo aktuatora 0,03 V, za mjerenje pomoću ULM uređaja taj iznos je veći, a iznosi 0,06 V. Iz rezultata se može zaključiti da za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$ mjerenje pomoću piezo aktuatora pokazuje veću preciznost i ponovljivost rezultata mjerenja za iste referentne vrijednosti.



Slika 24 Odnos referentne vrijednosti i napona za mjerenje pomoću ULM uređaja za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$



Slika 25 Odnos referentne vrijednosti i napona za mjerenje pomoću piezo aktuatora za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$

Iz grafičkih prikaza odnosa napona i referentnih vrijednosti za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$ [Slika 24 i Slika 25] može se vidjeti da nisu prisutna velika rasipanja napona za određene referentne vrijednosti, kao i da nema velike razlike između koeficijenata nagiba pravaca.

Tablica 20 Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću ULM uređaja za mjerno područje $\pm 30\mu\text{m}$

ULM								
Referentna vrijednost [μm]	1.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	2.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	3.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	1.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	2.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	3.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	Aritmetička sredina od 3 mjerenja [μm]	Odstupanje aritmetičke sredine od referentne vrijednosti [μm]
25,00	25,06	25,14	25,26	0,06	0,14	0,26	25,15	0,15
20,00	19,93	20,01	20,13	-0,07	0,01	0,13	20,03	0,03
15,00	15,05	15,09	15,17	0,05	0,09	0,17	15,10	0,10
10,00	9,97	10,05	10,17	-0,03	0,05	0,17	10,06	0,06
5,00	5,00	5,12	5,16	0,00	0,12	0,16	5,10	0,10
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-5,00	-4,84	-4,92	-4,88	0,16	0,08	0,12	-4,88	0,12
-10,00	-9,97	-9,93	-9,97	0,03	0,07	0,03	-9,95	0,05
-15,00	-14,89	-14,89	-14,97	0,11	0,11	0,03	-14,92	0,08
-20,00	-19,89	-19,97	-20,01	0,11	0,03	-0,01	-19,96	0,04
-25,00	-24,90	-24,70	-24,94	0,10	0,30	0,06	-24,85	0,15

Tablica 21 Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja A) za mjerno područje $\pm 30\mu\text{m}$

Piezo aktuator								
A								
Referentna vrijednost [μm]	1.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	2.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	3.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	1.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	2.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	3.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	Aritmetička sredina od 3 mjerenja [μm]	Odstupanje aritmetičke sredine od referentne vrijednosti [μm]
25,00	25,04	25,04	25,12	0,04	0,04	0,12	25,07	0,07
20,00	19,96	19,96	20,00	-0,04	-0,04	0,00	19,98	-0,02
15,00	14,96	14,96	15,00	-0,04	-0,04	0,00	14,98	-0,02
10,00	9,96	10,00	10,00	-0,04	0,00	0,00	9,99	-0,01
5,00	4,96	5,00	5,00	-0,04	0,00	0,00	4,99	-0,01
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-5,00	-5,04	-5,00	-5,00	-0,04	0,00	0,00	-5,01	-0,01
-10,00	-10,00	-10,00	-10,00	0,00	0,00	0,00	-10,00	0,00
-15,00	-15,00	-15,00	-15,04	0,00	0,00	-0,04	-15,01	-0,01
-20,00	-20,00	-20,00	-20,00	0,00	0,00	0,00	-20,00	0,00
-25,00	-25,00	-25,00	-25,00	0,00	0,00	0,00	-25,00	0,00

Tablica 22 Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja B) za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$

Piezo aktuator								
B								
Referentna vrijednost [μm]	1.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	2.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	3.mjerenje; Izmjerena vrijednost [μm]	1.mjerenje; Odstupanje Izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	2.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	3.mjerenje; Odstupanje izmjerene od referentne vrijednosti [μm]	Aritmetička sredina od 3 mjerenja [μm]	Odstupanje aritmetičke sredine od referentne vrijednosti [μm]
25,00	25,12	25,04	25,00	0,12	0,04	0,00	25,05	0,05
20,00	20,04	20,00	19,96	0,04	0,00	-0,04	20,00	0,00
15,00	15,04	14,96	14,96	0,04	-0,04	-0,04	14,99	-0,01
10,00	10,00	10,00	9,96	0,00	0,00	-0,04	9,99	-0,01
5,00	5,00	5,00	5,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-5,00	-4,96	-5,04	-5,00	0,04	-0,04	0,00	-5,00	0,00
-10,00	-9,96	-9,96	-10,00	0,04	0,04	0,00	-9,97	0,03
-15,00	-14,96	-14,96	-14,96	0,04	0,04	0,04	-14,96	0,04
-20,00	-19,96	-19,96	-19,96	0,04	0,04	0,04	-19,96	0,04
-25,00	-24,96	-25,00	-24,96	0,04	0,00	0,04	-24,98	0,02

Tablica 23 Odstupanje izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerenje pomoću aktuatora (set mjerenja A i B) za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$

Piezo aktuator		
A, B		
Referentna vrijednost [μm]	Aritmetička sredina od 6 mjerenja [μm]	Odstupanje aritmetičke sredine od referentne vrijednosti [μm]
25,00	25,06	0,06
20,00	19,99	-0,01
15,00	14,98	-0,02
10,00	9,99	-0,01
5,00	4,99	-0,01
0,00	0,00	0,00
-5,00	-5,01	-0,01
-10,00	-9,99	0,01
-15,00	-14,99	0,01
-20,00	-19,98	0,02
-25,00	-24,99	0,01

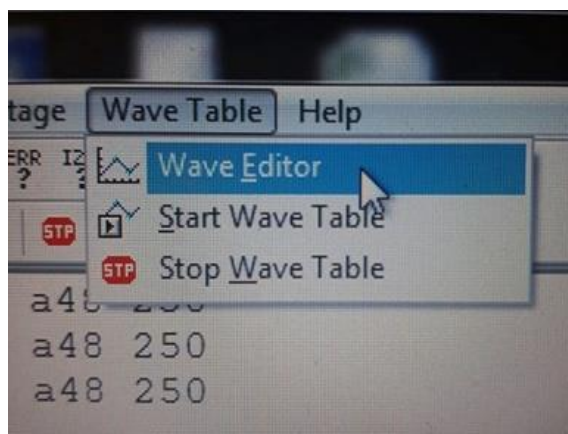
Kao i za ostala mjerna područja, odstupanja izmjerenih od referentnih vrijednosti za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$ [Tablica 20, Tablica 21, Tablica 22, Tablica 23] potvrđuju da se pri mjerenjima pomoću piezo aktuatora pojavljuju manja odstupanja izmjerenih od referentnih vrijednosti.

Podatci za sva mjerna područja dokazuju da se zamjenom umjeravanja pomoću ULM uređaja s umjeravanjem pomoću piezo aktuatora postižu bolji rezultati, odnosno veća preciznost i točnost rezultata mjerenja te samog postupka umjeravanja ticala za mjerenje kružnosti.

6. DINAMIČKO UMJERAVANJE TICALA

Pod dinamičkim umjeravanjem ticala spada, između ostalog, umjeravanje pomoću Flick etalona. Do sada se u LFSB nije obavljalo ovo umjeravanje jer LFSB ne posjeduje Flick etalon, no pomoću piezo aktuatora mogu se definirati takvi pomaci da se obavi dinamičko umjeravanje ticala. Položaj piezo aktuatora isti je kao kod statičkog umjeravanja ticala; okretni stol miruje, dok pomak ostvaruje pomična površina aktuatora. U programu za piezo aktuator šalju se naredbe za pomak aktuatora na način kako je opisano u nastavku.

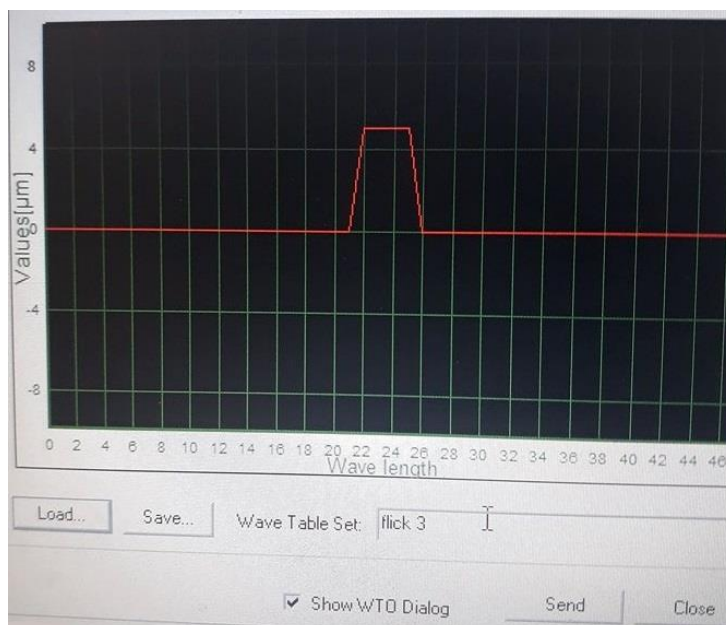
Pomak kojeg obavlja aktuator programira se pomoću računala. U programu za piezo aktuator postoji opcija „Wave Editor“ pomoću koje se mogu generirati uzorci (valovi) pomaka u nekom vremenskom intervalu te se ti valovi mogu uzastopno ponavljati i zaustaviti kada je potrebno [Slika 26].



Slika 26 Opcija „Wave Editor“ u programu za piezo aktuator

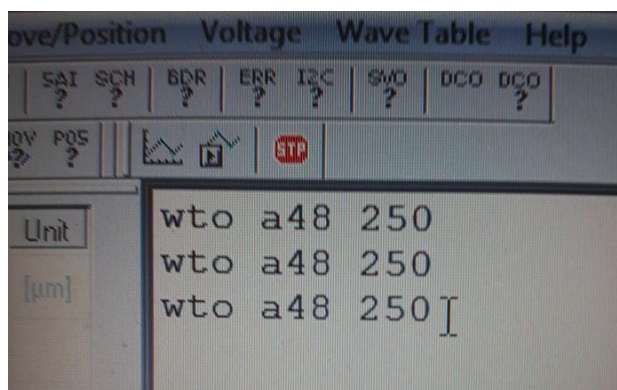
Za definiranje vala pomaka potrebno je poznavati vrijeme za koje okretni stol napravi puni krug, a to je u ovom slučaju 12 s. Odabere se željeni broj točaka (npr. 48) te se za svaku točku odredi veličina pomaka pokretne površine aktuatora. Ovo znači da će se svako 0,25 s obaviti pomak definiran za jednu točku. Tako se za programiranje Flick etalona za mjerno područje $\pm 3 \mu\text{m}$ za četiri uzastopne točke definira vrijednost pomaka $5 \mu\text{m}$, dok za sve ostale točke vrijednost pomaka iznosi $0 \mu\text{m}$. Ovaj pomak od $5 \mu\text{m}$ predstavlja zarez Flick etalona. Znači da će, od ukupno 12 s, 11 s biti pomak $0 \mu\text{m}$, a za vrijeme jedne sekunde ostvarit će se pomak od $5 \mu\text{m}$. Odabran je pomak od $5 \mu\text{m}$ jer su se provodila mjerenja u rasponu od $-2,5 \mu\text{m}$ do $2,5 \mu\text{m}$, tako da cijelo mjerno područje iznosi $5 \mu\text{m}$.

Unutar opcije „Wave Editor“ učitava se datoteka s definiranim pomacima za svaku točku te se može vidjeti grafički prikaz pomaka za svaku točku, odnosno jednog vala [Slika 27].



Slika 27 Prikaz „Wave Table Output“ u programu za piezo aktuator

Ovi podatci se šalju na početni zaslon programa za piezo aktuator u kojem se upisuju naredbe za pomak kojeg ostvaruje aktuator. Slika 28 prikazuje naredbe za dinamičko pokretanje aktuatora. Tako „wto“ znači „Wave Table Output“ i odnosi se na podatke vala koji su poslani na ovaj zaslon, „a48“ definira broj točaka za jedan val, a „250“ predstavlja vrijeme za koje se obavi jedan pomak (0,25 s ili 250 ms).



Slika 28 Prikaz naredbi za ostvarivanje pomaka u programu za piezo aktuator

Za ostala mjerna područja princip je isti, a razlika je samo u veličini pomaka. Za mjerno područje $\pm 10 \mu\text{m}$ veličina zareza je $16 \mu\text{m}$, a za mjerno područje $\pm 30 \mu\text{m}$ ta veličina iznosi $50 \mu\text{m}$. U nastavku su prikazani izvještaji mjerenja kružnosti za tri mjerna područja, a na temelju rezultata dobivenih pomoću LSC metode ($5,029 \mu\text{m}$; $16,013 \mu\text{m}$; $49,868 \mu\text{m}$) može se vidjeti da su odstupanja tako izračunate vrijednosti od referentnih vrijednosti pomaka aktuatora ($5 \mu\text{m}$; $16 \mu\text{m}$; $50 \mu\text{m}$) jako mala. Dobivena odstupanja ukazuju na dovoljno dobru pokretljivost ticala za mjerenje kružnosti.

Izvještaj mjerenja kružnosti

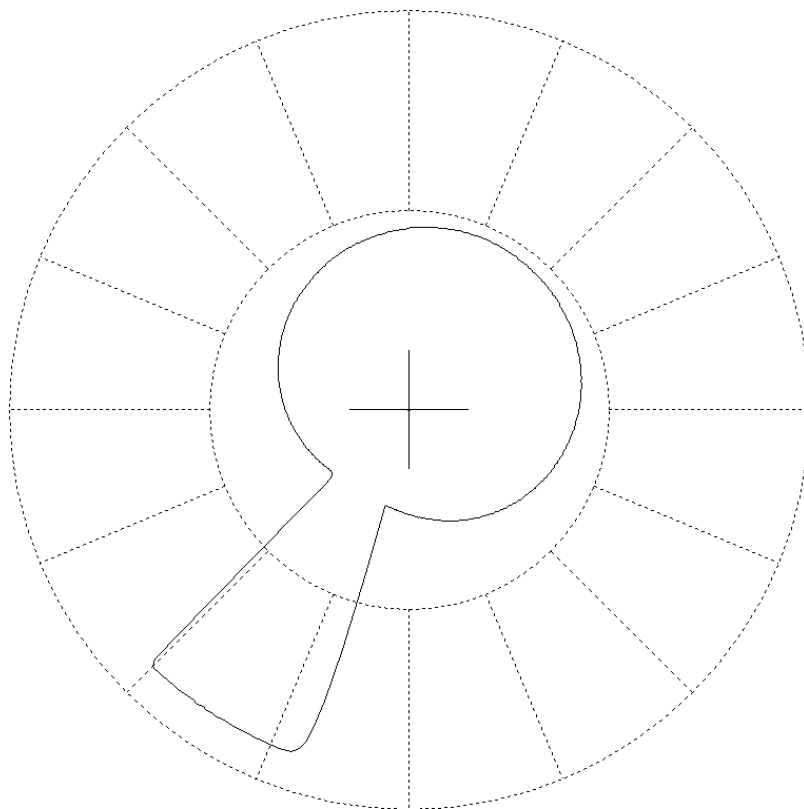
ID mjerenja: mjerenje 3

Datum: 5.2.2018.

Mjerni uređaj: MMQ-3

Mjeritelj: Marinela Dugandžić

Broj prikupljenih točaka: 600



Rezultati mjerenja:

Metoda	LSC
Rezultat [μm]	5,029

Izvještaj mjerenja kružnosti

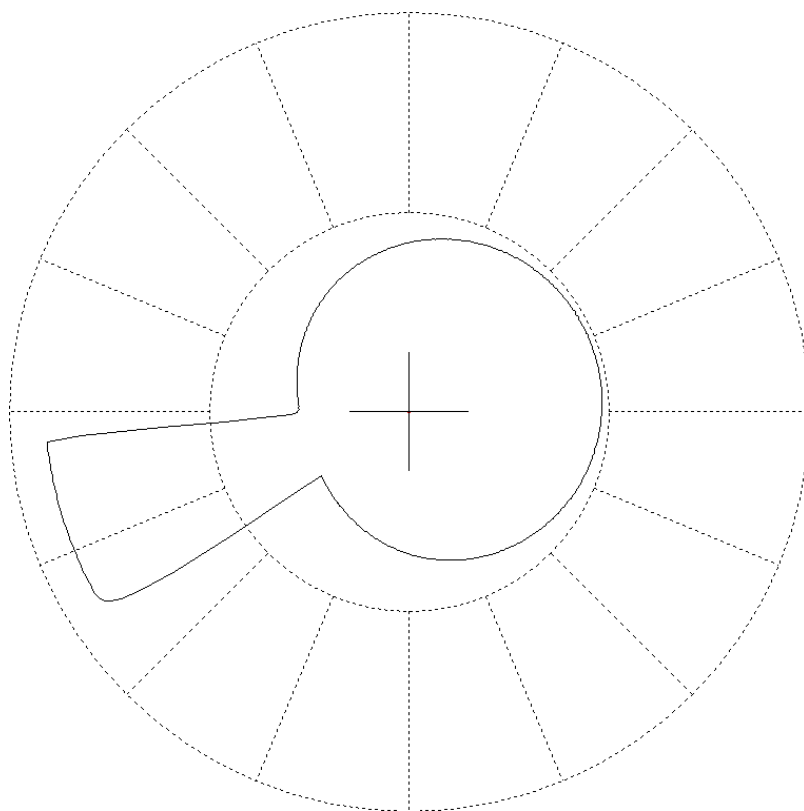
ID mjerenja: mjerenje 10

Datum: 5.2.2018.

Mjerni uređaj: MMQ-3

Mjeritelj: Marinela Dugandžić

Broj prikupljenih točaka: 600



Rezultati mjerenja:

Metoda	LSC
Rezultat [μm]	16,013

Izvještaj mjerenja kružnosti

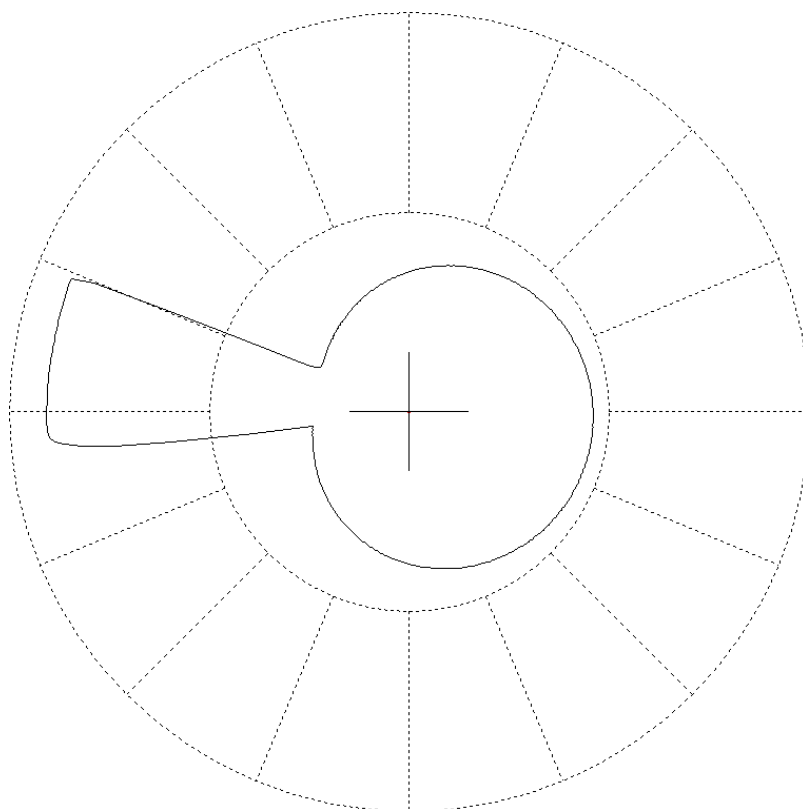
ID mjerenja: mjerenje 30

Datum: 5.2.2018.

Mjerni uređaj: MMQ-3

Mjeritelj: Marinela Dugandžić

Broj prikupljenih točaka: 600



Rezultati mjerenja:

Metoda	LSC
Rezultat [μm]	49,868

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu provodio se postupak umjeravanja ticala uređaja za mjerenje kružnosti MMQ-3 različitim metodama, korištenjem ULM uređaja i piezo aktuatora. Definirani su isti referentni pomaci za ista mjerna područja kako bi se rezultati mogli pravilno usporediti te su izmjereni naponi koji se pojavljuju pri otklonu ticala. Za svako mjerno područje i referentni pomak ponovljeno je više mjerenja te je usporedbom rezultata mjerenja prikazano da su rasipanja izmjerenih napona za isti referentni pomak veća korištenjem ULM uređaja, nego piezo aktuatora. Također se može primijetiti da su za ista mjerna područja korištenjem različitih metoda dobiveni različiti faktori korekcije ticala, te da se korištenjem faktora korekcije ticala dobivenog pomoću piezo aktuatora postižu manja odstupanja izmjerene od referentne vrijednosti. Dakle, usporedbom rezultata umjeravanja pomoću piezo aktuatora s rezultatima umjeravanja pomoću ULM uređaja može se zaključiti da se korištenjem piezo aktuatora postiže veća točnost i preciznost rezultata mjerenja, odnosno manja su odstupanja vrijednosti koje pokazuje mjerni uređaj od referentnih vrijednosti. To rezultira boljim umjeravanjem ticala s manjom mjernom nesigurnošću.

Također, korištenjem piezo aktuatora eliminirani su neki nedostaci umjeravanja pomoću ULM uređaja, kao što su premještanje ticala i popratne opreme s uređaja za mjerenje kružnosti na ULM uređaj te dugotrajno ručno definiranje pomaka na ULM uređaju.

Kao dodatak, obavljeno je i dinamičko umjeravanje ticala. Naime, za dinamičko umjeravanje korištenjem Flick etalona potrebno je imati različit etalon za svako mjerno područje, a LFSB ne posjeduje ni jedan Flick etalon, pa se do sada nije provodilo dinamičko umjeravanje ticala. Korištenjem piezo aktuatora omogućeno je dinamičko umjeravanje ticala, na način da se programiraju pomaci piezo aktuatora koji zamjenjuju Flick etalone za različita mjerna područja. Prikazani su rezultati dinamičkog umjeravanja ticala za tri mjerna područja, pomoću čega je provjerena ispravnost pokretljivosti ticala i softverska podrška računala uređaja za mjerenje kružnosti.

Korištenjem piezo aktuatora pri postupku umjeravanja otvorene su mogućnosti programiranja različitih pomaka koji zamjenjuju velik broj različitih etalona. Kao što je zamijenjen Flick etalon, tako se može zamijeniti i Multi-wave etalon (MWS), što ostavlja prostor za buduća proučavanja i razvijanja uporabe piezo aktuatora za umjeravanje ticala.

LITERATURA

- [1] https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/30_05_2009_10076_MOIDpredavanja.pdf
- [2] Farago, F. T.; Curtis, M. A.: *Handbook of Dimensional Measurement*, Industrial Press Inc., United States of America, 1994.
- [3] Šimunović, V.: *Analiza utjecaja digitalnog filtra na veličinu odstupanja od kružnosti*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [4] Runje, B.: *Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja*, Zagreb, 2014.
https://bib.irb.hr/datoteka/764412.Predavanja_TTM.pdf
- [5] „Euramet“: *Measurement – in short*, Danish Fundamental Metrology, 3rd edition
https://www.welmec.org/fileadmin/user_files/publications/Library/Metrology_in_short_3rd_ed.pdf
- [6] Jusko, O.; Lüdicke, F.: *Novel multi-wave standards for the calibration of form measuring instruments*
https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_5/5.3_koordinatenmesstechnik/texte/mwn_e.pdf
- [7] *A comparison of sensitivity standards in form metrology - Final results of the EURAMET project 649*, Article in Measurement Science and Technology, 2012.
- [8] P-620.Z –P-622.Z PIHera Precision Z-Stage
http://www.pi-usa.us/products/PDF_Data/P620_Z_Precision_Piezo_Nano-Positioning-Stage.pdf
- [9] E-625 Piezo Servo Controller, User Manual, Version 1.7.0, 2013.
https://static.physikinstrumente.com/fileadmin/user_upload/physik_instrumente/files/user_manuals/E-625_Cx_UserManual_PZ166E170.pdf?_ga=2.127838477.1644631157.1518819274-399638639.1518119356